

# Contribution au stockage d'énergie thermique en bâtiment : développement d'un système actif à matériaux à changement de phase

Serge Blaise Ekomy Ango

▶ **To cite this version:**

Serge Blaise Ekomy Ango. Contribution au stockage d'énergie thermique en bâtiment : développement d'un système actif à matériaux à changement de phase. Génie des procédés. Arts et Métiers ParisTech, 2011. Français. NNT : 2011ENAM0032 . pastel-00650275

**HAL Id: pastel-00650275**
**https://pastel.hal.science/pastel-00650275**

Submitted on 9 Dec 2011

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

ParisTech
INSTITUT DES SCIENCES ET TECHNOLOGIES
PARIS INSTITUTE OF TECHNOLOGY

ARTS ET MÉTIERS ParisTech

2011-ENAM-0032

École doctorale n° 432 : Science des Métiers de l'Ingénieur

# Doctorat ParisTech

# T H È S E

**pour obtenir le grade de docteur délivré par**

## l'École Nationale Supérieure d'Arts et Métiers

**Spécialité " Energétique"**

*Présentée et soutenue publiquement par*

**Serge Blaise EKOMY ANGO**

Le 24 Novembre 2011

# Contribution au stockage d'énergie thermique en bâtiment : développement d'un système actif à matériaux à changement de phase

Directeur de thèse : **Denis BRUNEAU**

**Jury**

| | | |
|---|---|---|
| **M. Antoine COLLIGNAN** | **Président** | **Professeur, Cirad-Amis, Montpellier** |
| **M. Jean-François BOUJUT** | **Rapporteur** | **Professeur, G-scop INP de Grenoble** |
| **M. jean pierre BEDECARRATS** | **Rapporteur** | **Maître de Conférences, HDR, LATEP, Pau** |
| **M. Denis BRUNEAU** | **Examinateur** | **Maître de Conférences, HDR, I2M-TREFLE, bordeaux** |
| **M. Patrick SEBASTIAN,** | **Invité** | **Maître de Conférences, HDR, I2M-TREFLE, bordeaux** |
| **M. Alain GUIVARCH** | **Invité** | **Docteur, CEP, Mines ParisTech, Paris** |
| **M. Jérôme LOPEZ** | **Invité** | **Docteur, Nobatek, Talence** |

**Arts et Métiers ParisTech - Centre de Bordeaux**
**I2M-TREFLE**

T H È S E

**Remerciements** :

Moments difficiles après tant d'années passés au sein du laboratoire (pas qu'à faire la thèse) ! en effet, sans vous, encadrants, permanents, secrétaires, femmes de ménage, doctorants, amis, ennemis et famille rien de cela n'aurait été possible. Soyez sur d'avoir participé de près ou de très près à l'aboutissement de ce travail de thèse (cette deuxième phase de mes travaux au sein du laboratoire) et je tiens donc à sincèrement vous remercier.

Je remercie Monsieur Antoine COLLIGNAN pour l'intérêt et l'enthousiasme qu'il a manifesté pour ses travaux et pour avoir accepter d'être président de jury de la soutenance de ma thèse.

Je tiens à remercier Monsieur jean Pierre BEDECARRATS pour le temps qu'il a bien voulu consacrer à l'examen de mon travail en acceptant d'être rapporteur de ma thèse. Le regard critique, juste et avisé qu'il a porté sur mes travaux ont été très précieux. Merci également Monsieur jean François BOUJUT d'avoir accepté d'être rapporteur de travail. Je vous remercie de l'attention toute particulière que vous avez accordée à mon travail.

Je tiens à remercier plus particulièrement Patrick SEBASTIAN pour ses précieux conseils, ses encouragements à engager cette recherche. Tes conseils, ta rigueur et ton analyse critique des situations de conception m'ont permis de mener à bien ce travail. J'aurai aimé souhaité profiter encore plus de ta sympathie et de ton agréable compagnie. J'aspire dans l'avenir à rattraper ce temps perdu.

Un grand merci à la famille Denis BRUNEAU. Merci infiniment ! Il s'en est passé des choses pendant ces années. Vous avez toujours (j'espère !!) cru en moi-même dans les moments les plus difficiles. J'ai beaucoup appris et échangé à vos côtés tant sur le plan humain que scientifique. Je reste admiratif de toute l'énergie et la force que vous mettez au service de vos métiers. J'aimerai vous assurer que les liens amitiés qui nous lient sont indéfectibles et irrévocables. Je vous dis tout simplement : ABORA NZAM A VOLQUE MINE !!!

Je tiens à remercier le personnel de l'atelier d'Art et Métiers ParisTech, campus de Bordeaux Talence plus particulièrement Monsieur Dimitri JAUPART et Monsieur Serge GENDRON. Je tiens à vous remercier pour votre contribution dans les différentes activités que j'ai menées au sein du laboratoire. Je tiens à vous souligner combien vous avez été important pour moi tout au long de mon séjour au sein du laboratoire. Je vous en suis éternellement reconnaissant. Ce fut un réel plaisir de travailler à vos côtés.

SOMMAIRE

I – Introduction générale ..... 9

II – Etat de l'art : utilisation des Matériaux à Changement de Phase (MCP) en stockage d'énergie en bâtiment ..... 13

*II.1 - Introduction* ..... 13

II.1.1 – Les MCP inorganiques ..... 13

II.1.2 – Les MCP organiques ..... 14

II.1.3 – Les MCP eutectiques ..... 14

II.1.4 – Bilan et conclusions ..... 15

*II.2 – Analyse des systèmes de stockage à base de MCP existants dans le bâtiment* ..... 17

II.2.1 – Utilisation passive des MCP en bâtiment ..... 20

II.2.1.1 – Intégration des MCP dans l'enveloppe du bâtiment ..... 21

II.2.1.1.1 – Les plaques de plâtres-MCP ..... 21

II.2.1.1.2 – Les enduits à base de MCP ..... 23

II.2.1.1.3 – Les murs trombes à base de MCP ..... 24

II.2.1.1.4 – Les blocs de béton-MCP ..... 24

II.2.1.2 – Autres intégrations des MCP dans le bâtiment ..... 25

II.2.2 – Utilisation active des MCP en bâtiment ..... 29

II.2.2.1 – Les systèmes d'échangeurs Air-MCP à plaques ..... 30

II.2.2.1.1 – Le système de Zalba et al. ..... 30

II.2.2.1.2 – Le système de Kunping et al ..... 35

II.2.2.1.3 – Le système de Hed et Bellander ..... 36

II.2.2.1.4 – Le système Turnpenny et al. ..... 38

II.2.2.1.5 – Analyse comparative et conclusions ..... 40

II.2.2.2 – Les systèmes d'échangeurs de chaleur Air-MCP en "amas" ..... 43

II.2.2.2.1 – Le système d'Arkar et al. ..... 43

II.2.2.2.2 – Le système de Takeda et al. ..... 46

II.2.2.2.3 – Analyse comparative et conclusions ..... 48

*II.3 – Bilan et conclusion* ..... 50

III – Contexte partenarial de développement : le concours international Solar Décathlon Europe 2010 (SDE 2010) ..... 53

*III.1 – Présentation du SDE 2010* ..... 53

*III.2 – Participation de l'Ecole Nationale d'Arts et Métiers (Arts et Métiers Paris Tech, campus Bordeaux-Talence) au SDE 2010 : la maison Napévomo* ..... 54

III.2.1 – Présentation générale ..... 55

III.2.2 – Présentation des systèmes énergétiques présents dans la maison Napévomo ..... 57

*III.3 – Conclusion* ..... 59

IV – Recherche de concepts d'un système de stockage d'énergie à MCP ..... 60

*IV.1 – Etablissement du Cahier des Charges* ..... 60

IV.1.1 – Estimation des besoins énergétiques de la maison Napévomo ..... 60

IV.1.1.1 – Présentation des objectifs de consommations visés ..... 62

IV.1.1.2 – Présentation de l'enveloppe et estimation des ponts thermiques de la maison Napévomo ..... 62

IV.1.1.3 – Présentation des scénarios de vie retenus ..... 66

IV.1.1.4 – Calculs des besoins thermiques ..... 69

IV.1.2 – Description des contraintes liées à l'intégration du système dans la maison Napévomo ..... 71

*IV.2 – L'analyse fonctionnelle du système* ..... 71

IV.2.1 – La fonction principale ..... 72

IV.2.2 – Les fonctions secondaires et leurs fonctions contraintes ..... 72

*IV. 3 - Analyse architecturale du système* ..... 73

IV.3.1 – L'analyse et la structuration du besoin ..... 73

IV.3.1.1 – Analyse du besoin ..... 73

IV.3.1.2 – Critères de qualification ..... 74

IV.3.1.2.1 – Les critères technologiques ..... 75

IV.3.1.2.2 – Les critères économiques ..... 76

IV.3.1.2.3 – Les critères techniques ..... 76

IV.3.2 – Approche fonctionnelle du système....77
IV.3.3 – Approche organique du système....79
IV.3.3.1 – Le diagramme FAST du système....79
IV.3.3.2 – Différents composants du système....80
IV.3.3.3 – Les blocs diagrammes fonctionnels du système....81
*IV.4 – Le choix de matériaux de l'échangeur*....83
IV.4.1 – Choix du MCP....83
IV.4.2 – Caractérisation des MCP....84
IV.4.3 – Choix des matériaux des tubes contenant le MCP....86
*IV.5 – Conclusion*....88
V – Modélisation et dimensionnement du système....90
*V.1 – Le modèle de calcul de la vitesse de l'air*....90
*V.2 – Le modèle de calcul du coefficient d'échange*....91
*V.3 – Le modèle de calcul des dimensions de l'échangeur*....93
*V.4 – Le modèle de calcul des pertes de charge*....96
*V.5 – Conclusion*....106
VI – Réalisation d'un échangeur Air-MCP....107
*VI.1– Les solutions technologiques de l'échangeur Air-MCP*....107
VI.1.1 – Le sous ensemble caisson-MCP....109
VI.1.2 – Le sous-ensemble circuit MCP....110
VI.1.3 – Le sous ensemble circuit aéraulique....114
*VI.2 – Le synopsis de fabrication et de montage de l'échangeur Air-MCP*....116
VI.2.1 – Fabrication des pièces d'un échangeur Air-MCP....116
VI.2.1.1 – Fabrication des contenants de MCP....117
VI.2.1.2 – Fabrication des déflecteurs....120
VI.2.1.3 – Fabrication du dispositif de remplissage, de vidange et de dilatation des contenants MCP....120

VI.2.2 – Assemblage des contenants de MCP, des colonnes de contenants de MCP et du dispositif de remplissage, de vidange et de dilatation des contenants MCP .....123

VI. 2.3 – Montage des échangeurs et tests.....126

VI.2.4 – Remplissage des produits dans les coffrets et intégration du système dans la maison.....127

VI.2.4.1 – Amélioration de la conductivité des MCP.....127

VI.2.4.2 – Préparation des produits et remplissage des coffrets .....130

VI.2.4.3 – Installation du système de rafraîchissement dans la maison Napévomo...131

*VI.3 – Conclusion* .....132

VII – Essais et validation des premiers résultats.....134

*VII.1 – Description du dispositif expérimental*.....134

*VII.2 – Analyse des premiers résultats du dispositif expérimental*.....138

VII.2.1 – Fonctionnement diurne .....138

VII. 2.1.1 – Vitesses débitantes .....138

VII.2.1.2 – L'efficacité du rafraîchissement .....139

VII.2.1.3 – Les pertes de charge aux bornes du circuit MCP .....144

VII.2.1.4 – Le coefficient des pertes de charges .....145

VII.2.1.5 – La puissance transmis au fluide.....146

VII.2.2 – Fonctionnement nocturne : solidification des MCP.....149

*VII.3 – Le fonctionnement du système au salon Solar Décathlon Europe (Madrid)*.....152

*VII.4 – Conclusion* .....153

VIII – Analyse économique succincte d'un échangeur Air-MCP pour le rafraîchissement et réchauffement d'un bâtiment .....154

IX – Conclusion générale et perspectives.....156

X – Bibliographies.....159

XI – Annexes .....165

Annexe 1 .....166

Annexe 2 .....168

Annexe 3 .....175

## Nomenclature

*Lettres latines*

| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| Cp | Chaleur massique | J/kg.K | Nu | Nombre de Nusselt | / |
| d | Densité des MCP | / | NUT | Nombre d'Unités de Transfert | / |
| Dh | Diamètre hydraulique | m | Pe | Puissance frigorifique | W |
| e | Epaisseur d'une lame | m | Pr | Nombre de Prandt | / |
| f | Facteur de fanning (frottement) | / | Q | Débit massique | kg/s |
| F | Fraction volumique | W/m.K | R | Rapport de capacité | / |
| h | Coefficient d'échange convectif | $W/m^2.K$ | Re | Nombre de Reynolds | / |
| H | Coefficient d'échange thermique | $W/ m^2.K$ | S | Section du circuit d'air | $m^2$ |
| $K_e$ | Coefficient de pertes de charge à l'entrée | / | t | Durée d'utilisation des MCP | s |
| $K_C$ | Coefficient de pertes de charge à la sortie | / | T | Température | K |
| l | Largeur d'une lame de MCP | mm | v | Vitesse de l'air | m/s |
| L | Longueur de l'échangeur | mm | V | Volume | $m^3$ |
| Lv | Chaleur Latente | J/kg | Vd | Vitesse débitante | m/s |
| M | Masse de MCP dans un caisson | kg | | | |

*Grecques*

| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| $\Delta p$ | Perte de charge | Pa | $\lambda$ | Conductivité | W/m.K |
| $\varepsilon$ | Efficacité | / | $\upsilon$ | Viscosité cinématique | $m^2/s$ |
| $\xi$ | Coefficient des pertes de charge hydraulique | / | $\mu$ | Viscosité dynamique | kg/m.s |
| $\rho$ | Masse volumique | $kg/ m^3$ | | | |

*Indices*

| | | | |
|---|---|---|---|
| 1 | Chaud | m | Matière |
| 2 | Froid | $m_{air}$ | Débit massique d'air |

| | | | |
|---|---|---|---|
| air | Air | Mat | Matériaux |
| c | Caisson | max | Maximum |
| Dim | Dimensions | MCP | Matériaux à changement de phase |
| Conv | Convection | min | Minimum |
| Dd | Vitesse Débitante | mec | Mécanique |
| D | Débit | s | Sortie |
| e | Entrée | sp | Sommation des pertes de charge |
| exp | Expérience | t | Temps |
| f | Fusion | th | Thermocouples |
| g | Gaine | tr | Transmis |
| H | Hydraulique | tt | Total |
| Rt | Renouvellement | x | Section de la conduite |
| Qttés | Quantités | v | vitesse |

# I – Introduction générale

Les bâtiments construits avant 1974 représentent 60% du parc immobilier français. Ils consomment en moyenne 350 kWh/$m^2$/an (industrie.gouv.fr) et la consommation française liée à la climatisation ainsi que la ventilation des surfaces climatisées (chiffre excluant donc la ventilation des surfaces non climatisées) est de l'ordre de 4,5 TWh (sur la base de 30 kWh/$m^2$). Ces consommations vont augmenter de 20% à 30% tous les cinq ans. Cette situation est due plus particulièrement au réchauffement climatique qui augmente la consommation d'énergie liée à la climatisation, impactant fortement sur l'environnement (Adnot, 2003).

Pour limiter ces besoins énergétiques dans le résidentiel et le tertiaire conformément à la réglementation thermique RT 2012 (limitation de la consommation d'énergie primaire des bâtiments neufs à un maximum de 50 kWhEP/$m^2$.an en moyenne), plusieurs pistes sont explorées. Notamment, de nombreux travaux portent sur les enveloppes de bâtiments car elles participent à l'amélioration passive des conditions climatiques de la maison, donc à la limitation de son besoin en climatisation. A cet effet, certaines études se sont orientées sur les matériaux qui régulent mieux les transferts de chaleur dans les différents compartiments du bâtiment : c'est le cas des Matériaux à Changement de Phase.

Les Matériaux à Changement de Phase, appelés communément « MCP », sont des matériaux intelligents qui reposent sur l'application d'un principe physique simple : ils se liquéfient en absorbant de l'énergie à partir d'une certaine température caractéristique pour chaque type de matériau (en général fixée par leur formulation) et restituent cette énergie lorsque la température de leur environnement est inférieure à celle-ci.

Les matériaux à changement de phase sont utilisés dans différents domaines : le stockage d'énergie solaire, le refroidissement des boîtes de transport de produits sensibles, les systèmes de mémoires permanentes en informatique (conservation de l'information sans utilisation électrique dans une transition de phase vitreuse/cristalline : la PRAM), les systèmes de climatisation (liquide frigorigènes), l'industrie textile (par exemple les vêtements) ainsi que dans le domaine de la construction des bâtiments où ils sont utilisés dans les systèmes passifs et actifs. (Bufalino et al., 2008).

L'utilisation des matériaux à changement de phase dans le bâtiment est un concept relativement ancien. Il n'a jamais pu être réellement exploité en raison des difficultés de mise en œuvre inhérente à ces matériaux (Noël et al., 2007).

Les premiers systèmes utilisés sont les systèmes passifs où les matériaux à changement de phase sont incorporés dans les matériaux du bâtiment.

Dès les années 70, période du premier choc pétrolier, pour anticiper la pénurie et/ou la hausse des prix du baril de pétrole, l'utilisation des matériaux à changement de phase dans le bâtiment fait l'objet d'études très poussées pour les constructeurs de bâtiments afin de limiter les consommations d'énergie dans les bâtiments. Les premiers panneaux de construction de bâtiment contenant les matériaux à changement de phase sont réalisés au Mexique par Wright et Balcomb (Riederer et Catarina, 2007). Ils fabriquent des maisons « passives » avec des systèmes dits à gains direct (matériaux de construction intégrant des paraffines dans les bétons) dans les années 1970.

Dans la même année, en France, on réalise le premier panneau plâtre-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 (Riederer et Catarina, 2007)

D'après le rapport final de la convention ADEME-EDF (Kherrouf. 2008), au cours de ses dernières années, parmi les récentes problématiques étudiées sur les MCP, les études concrètes (à l'échelle 1) sur les modes d'intégration des MCP dans les bâtiments sont peu nombreuses. Elles sont en majorité au stade expérimental. Les plus avancées portent en général sur l'incorporation des paraffines, le plus souvent micro-encapsulées, aux couches de plâtre de parois légères, dans les panneaux de bois, dans le béton, dans des composites bétons léger/bois, dans les matériaux isolants transparents, ou encore dans les lamelles de systèmes de protection solaire. Les résultats à grandes échelles sont effectués en général dans des cellules tests et les données correspondantes sont difficiles à obtenir. De ces travaux, il en ressort que les systèmes actuels renferment deux problèmes majeurs : d'une part une limitation globale de la masse de MCP concernée et d'autre part une limitation constatée du transfert de chaleur

Actuellement, la majorité des travaux des systèmes passifs sont orientés sur :

- l'utilisation de MCP, intégrés à l'enveloppe du bâtiment, pour des applications de chauffage ;
- l'intégration de MCP à l'enveloppe de bâtiments à faible inertie thermique dans le but d'améliorer leur confort d'été.

Les systèmes actifs font leurs premières apparitions vers la fin des années 1970. Les premiers systèmes sont réalisés par la société Thermac. Cette société a cessé ses activités en 1985 pour des raisons de rentabilité (Riederer, 2007). Actuellement les travaux sur les systèmes actifs se poursuivent auprès des organismes spécialisés dans les matériaux à changement de phase notamment Rubitherm Gmbh, BASF, Cristopia, TEAP, etc., ainsi que certains Laboratoires de Recherche en Espagne (université de Zaragoza), en Allemagne (Dôrken Gmbh & Co.KG) et en France (CTSB), etc. Ces structures orientent leurs travaux sur le stockage thermique à court terme qui est pour eux, la clé de l'efficacité des technologies intermittentes (c'est-à-dire emmagasiner de l'énergie pendant un certain temps et la restituer fonction des besoins).

L'objectif de mes travaux de thèse est la réalisation d'un système actif : un échangeur de chaleur Air-MCP pour améliorer le confort des résidences. Ce dernier a été dimensionné pour une maison qui participait au concours International Interuniversitaire << Solar Décathlon Europe 2010 >> en Espagne (SDE 2010).
Les travaux menés dans cet objectif sont :

- la conception, le dimensionnement et la fabrication d'un système de stockage / déstockage permettant un rafraîchissement ou un réchauffement semi-passif d'une maison ;
- la mise en place de ce dernier dans la maison Napévomo qui a participé au concours International Interuniversitaire SDE 2010 et une validation qualitative des performances de celui-ci ;
- le développement d'essais en laboratoire de façon à appréhender le fonctionnement de celui-ci.

Le processus employé pour atteindre notre objectif est classique. Après un chapitre introductif donnant une vision générale de l'utilisation des matériaux à changement de phase dans le bâtiment ainsi que l'état de l'art des systèmes de rafraîchissement et de chauffage des bâtiments à partir matériaux à changement (MCP) et plus particulièrement les systèmes actifs (chapitre 2), nous présentons le contexte dans lequel nos travaux se sont déroulés (chapitre 3) notamment la maison où est installé le système et le concours International Interuniversitaire auquel ce dernier a participé.

Ensuite nous énonçons les différentes contraintes qui nous permettent d'établir notre Cahier des Charges. Ce dernier nous permet de déterminer les concepts, les choix architecturaux et le choix du système d'échangeur de notre dispositif (chapitre 4). Cette démarche amène à proposer un modèle de calcul stationnaire, basée sur une approche NUT-$\varepsilon$ (chapitre 5) qui nous permet d'effectuer le dimensionnement du système complet moyennant une caractérisation préalable des MCP retenus en terme de conductivité thermique, de plage de températures de fonte et de chaleur latente associée. Dans le chapitre 6, nous présentons dans un premier temps les solutions technologiques retenues pour réaliser ce système et les différents sous ensembles de celui-ci ; un synopsis du processus de fabrication à l'échelle 1 de celui-ci est ensuite proposé. Nous analysons dans le dernier chapitre les premiers résultats sur les essais in situ (maison Napévomo à Madrid de juin 2010) et les premiers résultats issus du dispositif expérimental mis en place au laboratoire.

## II – Etat de l'art : utilisation des Matériaux à Changement de Phase (MCP) en stockage d'énergie en bâtiment

### *II.1 - Introduction*

Les matériaux à changement de phase (MCP) dans les bâtiments ont pour but de stocker et de déstocker de l'énergie en fonction des besoins de chauffage et/ou de refroidissement. Par exemple, l'utilisation de MCP par intégration de ceux-ci dans les enveloppes légères permet d'attribuer à celles-ci une inertie identique à celle des parois lourdes. D'après le fabricant de MCP, BASF micronal, une paroi contenant 2 cm de MCP fabriqué par BASF a la même performance en terme d'inertie thermique qu'une brique d'épaisseur de 36 cm ou un mur en béton d'épaisseur de 24 cm ou du bois massif d'épaisseur 38 cm (Figure 1).

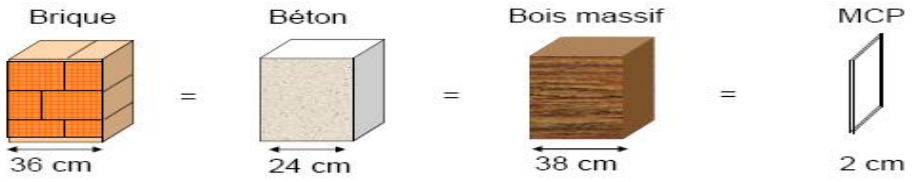



*Figure 1 : Schéma comparatif des inerties thermiques en fonction de l'épaisseur et la nature du matériau (d'après Hill et al., 2004)*

D'après Atul et al. (2007) ainsi que Kherrouf et al. (2008), il existe quatre types de transformations de MCP : gaz/liquide, gaz/solide, solide/solide et solide/liquide. Dans les systèmes de stockage d'énergie pour les bâtiments, on utilise en général les transformations solide/liquide parce qu'elles ont des enthalpies de changement de phase élevées (quoi qu'en générale inférieures à celles des transformations gaz/solide et gaz/liquide) et des expansions volumiques réduites (<10%) lors de la fusion.

Parmi les MCP subissant cette transformation, nous avons trois groupes de matériaux : les inorganiques, les organiques et les eutectiques.

#### II.1.1 – Les MCP inorganiques

Les matériaux ou les substances inorganiques ont une température ou une plage de températures de fusion comprise entre -100 °C et +1000°C. Les plus utilisés sont : l'eau

(température de fusion 0°C), les solutions aqueuses de sel (température de fusion inférieure à 0°C), des sels hydratés (température de fusion comprise entre 5°C et 130°C), des mélanges de sels, des mélanges de métaux (température de fusion supérieur à 150°C). Ils ont plusieurs avantages : ils ont une chaleur latente importante et une haute conductivité thermique. Ils ont une fusion nette (c'est-à-dire une plage de fusion étroite). Ils sont non-inflammables et ils ont un coût d'investissement abordable. Ils sont en général facilement disponibles. Les problèmes majeurs rencontrés lors de leurs utilisations sont en rapport avec la ségrégation, la corrosion et la surfusion nécessitant ainsi l'utilisation d'agent de nucléation afin d'être fiables (Farid et al., 2004 et Vineet Veet, 2005).

### II.1.2 – Les MCP organiques

Les matériaux ou les substances organiques ont une température ou une plage de température comprise entre 0° C et 150°. Les plus utilisés sont essentiellement à base de paraffine, des acides gras et des alcools de sucre. Ils comportent certains inconvénients, comparés aux avantages des MCP inorganiques : ils ont une plus faible conductivité à l'état solide et à l'état liquide, ils ont une chaleur latente de fusion plus faible, ils sont inflammables. Par contre, ils ont des avantages majeurs ; ils sont disponibles dans une large gamme de températures et sont compatibles avec les matériaux conventionnels de construction, ils sont chimiquement stables et ne nécessitent pas l'utilisation d'agents de nucléation. Ils sont non réactifs la plus part du temps et ils sont recyclables (Farid et al., 2004 ; Vineet Veer et BUDDHI, 2005).

### II.1.3 – 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). Ils ont deux principaux avantages ; ils ont un point de fusion net similaire à une substance pure et leurs chaleurs latentes volumétriques sont légèrement supérieures à celle des composés organiques purs. Leurs deux principaux inconvénients sont que l'on a peu de données disponibles sur les propriétés thermiques de ces matériaux et ils sont peu utilisés au niveau des systèmes industriels (Vineet Veer et BUDDHI, 2005).

Le Tableau 1 représente certaines propriétés thermiques de certains MCP.

| Matériaux | | Température de fusion (°C) | Enthalpie de fusion (kj/kg) |
|---|---|---|---|
| PCMs Organiques | Eau | 0 | 333.6 |
| | Stéarate de butyle | 19 | 140 |
| | L'acide caprique-laurique | 21 | 143 |
| PCMs Inorganiques | $KF.4H_20$ | 18.5 | 231 |
| | $Mn(No_3)_2 .6H_20$ | 25.8 | 125.9 |
| | $Na_2SO4.10H_2O$ | 32 | 251 |
| PCMs Eutectiques | $66,6\%CaCL_2.6H_2O+33,3\%Mgcl_20.\ 6H_20$ | 25 | 127 |
| | $48\%CaCL_2+4,3\%\ NaCl+47,3\%H_20$ | 26,8 | 188 |
| | $47\%Ca(NO_3)_2.4H2O+53\%Mg(NO_3)_2\ 6H_20$ | 30 | 136 |

*Tableau 1 : Certaines propriétés thermiques de certains MCP (d'après Vineet Veet, 2005)*

### II.1.4 – Bilan et conclusions

Dans les bâtiments, Les MCP les plus utilisés sont à base de paraffines et de sels hydratés.

Les paraffines sont en général des molécules linéaires d'hydrocarbures saturés (CnH2n+2). Leurs cristallisations libèrent une grande quantité de chaleur latente. Ils sont disponibles dans une large gamme de températures et on peut les obtenir facilement. Ils sont chimiquement inertes et montrent peu de changements de volume sur la fusion. Ils sont fiables, prévisibles, peu coûteux et non-corrosif. Ils montrent quelques propriétés indésirables tel que : une faible conductivité thermique, la non compatibilité avec les supports en plastique. Ils sont aussi modérément inflammables.

Le sel hydraté le plus utilisé est le sulfate sodium plus particulièrement le sel de Glauber en forme déca hydratée ($Na_2SO_4 \cdot 10H_2O$). Il est très stable chimiquement. Il ne se décompose pas même sous l'effet de la chaleur, et il ne réagit pas aux températures courantes avec des agents oxydants ou réducteurs. A des températures élevées, il peut être réduit en sulfure de sodium. On l'utilise pour les systèmes de stockage d'énergie dans les bâtiments à cause de ses propriétés de solubilité inhabituelle, ainsi que de sa chaleur de cristallisation élevée (Vineet Veer et BUDDHI, 2005).

Le Tableau 2 donne à titre d'exemples les propriétés thermiques de quelques MCP à base de paraffines et de sels.

| Matériaux | | Température de fusion (°C) | Enthalpie de fusion (kJ/kg) | Conductivité thermique (W/mk) | Densité ($kg/m^3$) |
|---|---|---|---|---|---|
| MCP à base de paraffine | Hexadecane | 18 | 236 | 0,17 à 0,26 | 780 |
| | Heptadecane | 22 | 214 | | |
| | Octadecane | 28 | 244 | | |
| MCP à base de sels hydratés | $Na_2SO_4 \cdot 10H_2O$ 60% | 32 | 251 | / | / |
| | $Na(CH_3COO).3H_2O$+40% $CO(NH_2)_2$ | 30 | 200,5 | | |
| | $CaCL_2.6H_2O$ | 29 | 171 | 0,540 (liquide 61,2°C) | 1562 (liquide 32°C) |

*Tableau 2 : Propriétés thermiques de MCP à base de paraffine et de sels hydratés (d'après Khundhair et al.., 2004)*

L'ensemble des critères (ou propriétés souhaitables) qui doivent intervenir ou être recherchés lors du choix du MCP pour une application donnée dans le bâtiment sont énumérés dans le Tableau 3.

| **Critères** | **Propriétés** |
|---|---|
| Physiques | - Température de changement de phase adaptée aux besoins de l'application ;<br>- Chaleur de fusion élevée pour assurer la compacité des dispositifs de stockage ;<br>- Bonne conductivité thermique ;<br>- Stabilité lors de cycles de fusion/solidification ;<br>- Surfusion réduite. |
| Technologiques | - Expansion volumique faible lors de la fusion afin de minimiser les contraintes mécaniques dans le support de stockage ;<br>- Stabilité physico-chimique, longue durée de vie;<br>- Compatibilité avec les matériaux du support de stockage. |
| Autres | - Coût d'investissement réduit ;<br>- Disponibilité ;<br>- Dangerosité (toxicité, inflammabilité,….) réduite ;<br>- recyclabilité |

*Tableau 3 : Différents critères à respecter lors du choix d'un MCP pour une application donnée dans un bâtiment (Khundhair et al., 2004)*

L'utilisation actuelle de ces matériaux de type paraffine et sels hydratés en bâtiment est détaillée au paragraphe suivant. Cette utilisation est soit passive (MCP intégré dans l'enveloppe du bâtiment généralement), soit active (circulation du flux forcée sur les MCP généralement).

### *II.2 – Analyse des systèmes de stockage à base de MCP existants dans le bâtiment*

Comme annoncé dans le paragraphe précédant, l'utilisation des MCP dans les bâtiments est ancestrale. Elle a pris un regain de plus en plus important au cours de ses dernières années du fait des éléments suivants (Yinping et al., 2006) :

* La grande différence de consommation d'énergie entre les heures de pointe et les heures creuses, pour le rafraîchissement (été) et pour le chauffage des bâtiments (hiver et saisons intermédiaires) ;

* L'utilisation croissante de l'énergie solaire : l'énergie solaire thermique est disponible à des moments qui ne coïncident pas nécessairement au besoin. Le stockage d'énergie thermique devient un moyen d'adapter la production et la consommation de cette énergie thermique solaire (Figure 2, schémas (a) (b) (c) (d));

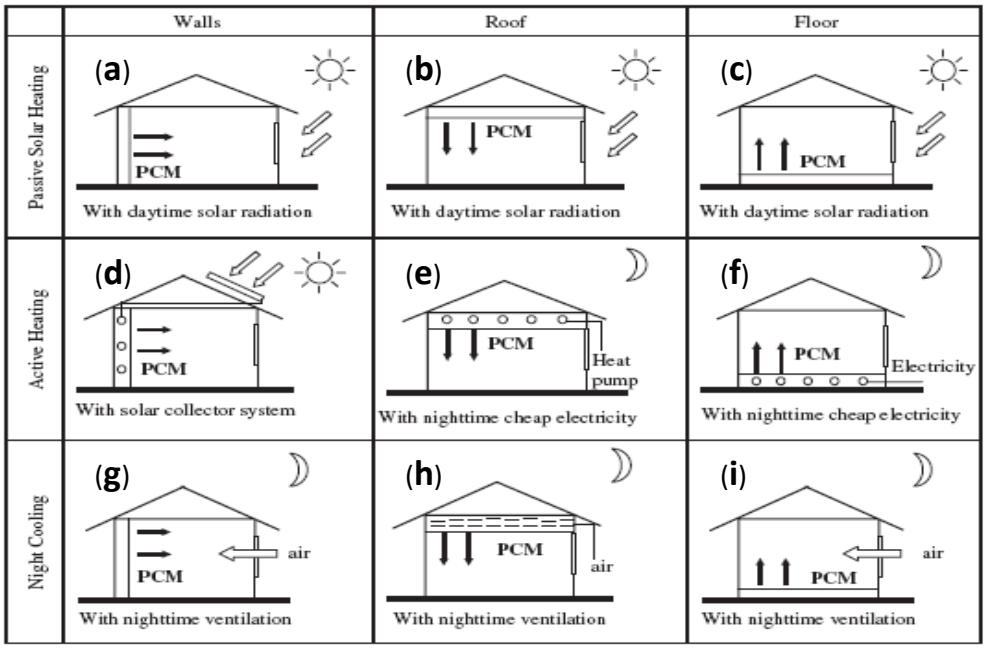


*Figure 2 : Quelques dispositions des MCP dans les bâtiments (d'après Yinping et al., 2006)*

* Une volonté d'utilisation rationnelle plus efficace des unités de production de chauffage et de refroidissement. Il s'agit ici essentiellement de ne consommer de l'énergie électrique que sur des tranches horaires à faible coût, pour utiliser l'énergie produite sur d'autres tranches horaires qui correspondent au besoin (Figure 2, schéma (e) et (f)). L'utilisation de ces MCP en assistance au chauffage ou au refroidissement est soit passive soit active (Figure 2, schémas (a) (b) (c) ou (d) (e) (f)). Concernant l'utilisation de ceux-ci en assistance au refroidissement (rafraîchissement), une phase de régénération de MCP (solidification) nocturne est nécessaire, afin d'assurer une capacité de stockage de chaleur diurne quotidienne ; celle-ci peut être passive (free cooling) ou active (renouvellement d'air nocturne par ventilation forcée (Figure 2, schéma (g) (h) (i)).

Parmi les différents moyens d'intégration de MCP dans les bâtiments étudiés dans la littérature, on estime (Hawes et al., 1993) qu'il y a 2 méthodes d'utilisation de MCP dans les bâtiments : l'intégration directe et l'encapsulation avant intégration.

* intégration directe : les MCP sont intégrés dans les matériaux de construction lors de la fabrication de ces matériaux de construction ou les MCP sont disposés dans les éléments autres du bâtiment ;

* encapsulation avant intégration : les MCP sont soit en micro encapsulation soit en macro encapsulation. Ces derniers sont intégrés soit dans les matériaux de construction soit dans les échangeurs de chaleur.

Micro encapsulation :

La micro encapsulation est un dispositif où les MCP sont enfermés dans des vésiculaires de petites tailles (quelques millimètres ou quelques centimètres) prenant différentes formes (sphères ou petits cylindres longitudinaux). Les MCP ainsi encapsulés peuvent être ensuite utilisé dans un système de stockage d'énergie latente dans lesquels ils sont apposés en amas ; le fluide vecteur de l'énergie à stocker (air ou eau) traverse alors cet amas ; l'avantage de cette géométrie interne de stockeur en amas de MCP micro-encapsulés est qu'elle offre une grande surface d'échange (surface sphérique). D'autre part, la faible conductivité thermique n'est pas un facteur limitant des transferts du fait des petites dimensions des vésicules. Par contre il peut arriver que des cycles de fusion-consolidation répétés induisent l'apparition d'un décollement entre le MCP et sa vésicule contenante, et

ainsi une augmentation forte et fortement préjudiciable de la résistance thermique vésicule-MCP. L'autre avantage de micro-encapsulés est qu'ils sont aisés à manipuler et que leur intégration est adaptable aisément à tout système passif tels que des matériaux de constructions de type béton en plâtre ou panneau bois reconstitué ou système actif (Amar, 2003). Le produit le plus connu est le nodule (Figure 3) fabriqué par la société Cristopia (http://www.cristopia.fr).

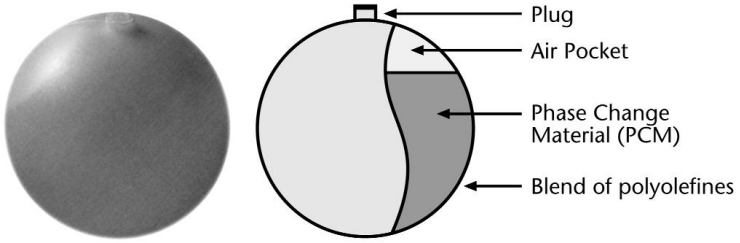



*Figure 3 : Micro encapsulateur nodule fabriqué par Cristopia (d'après Bufalino, 2008)*

Les fabricants les plus connus produisant ce type de produits sont : Dupont de Nemours (Energain), BASF (produits Micronal) et RUBITHERM. Les différentes informations de ses constructeurs se trouvent en annexe 1.

Macro encapsulation

La macro encapsulation est un dispositif où le MCP est emballé dans des contenants aux dimensions décimétriques à métriques (tubes, sachets, etc). Ces MCP macro encapsulés peuvent être utilisés comme parties constituantes d'échangeur de chaleur. Ces MCP macro encapsulés sont généralement fabriqués pour chaque application visée.

La faible conductivité thermique des MCP peut devenir dans le cas d'une macro-encapsulation, un élément limitateur des transferts. De plus une attention particulière est à apporter au décollement entre le MCP et son contenant qui peut apparaître après plusieurs cycles de fusion-consolidation.

Ces MCP, sous ces différentes formes sont utilisés soit de manière passive soit de manière active, comme indiqué sur la Figure 4.

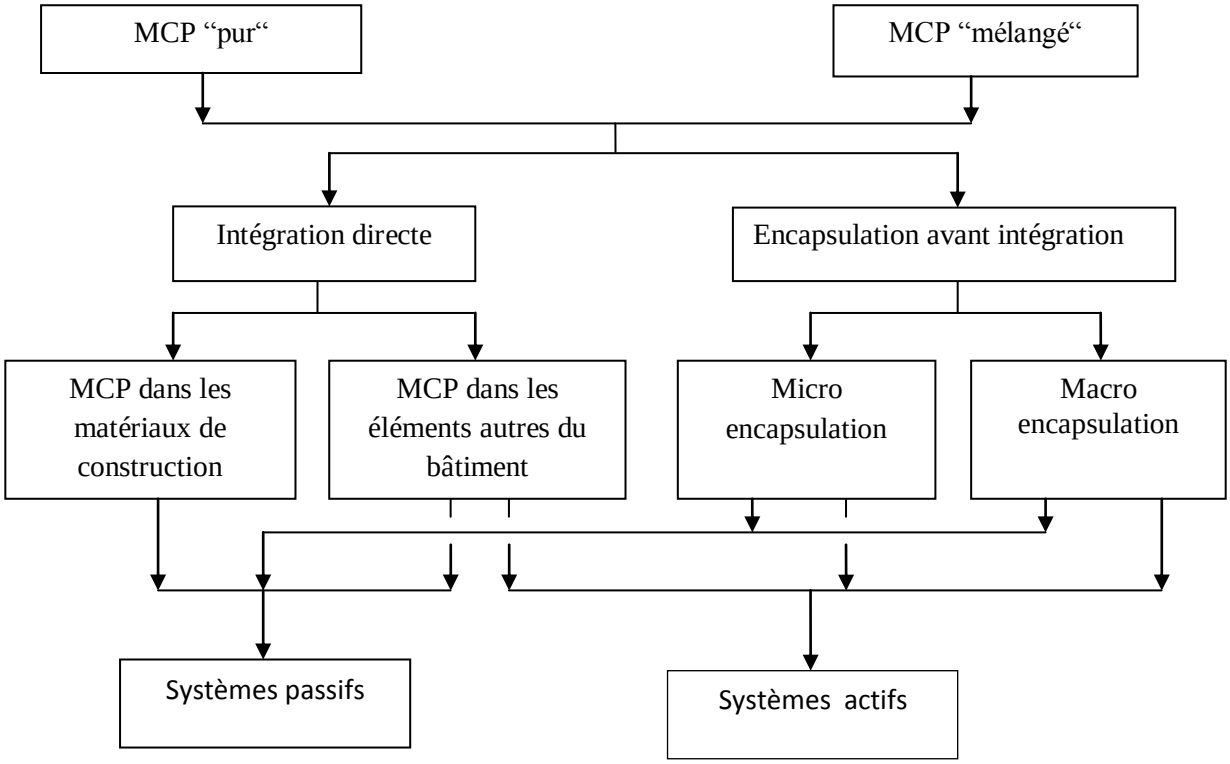



*Figure 4 : Différentes modes d’utilisation des MCP dans le bâtiment*

### II.2.1 – Utilisation passive des MCP en bâtiment

Il s’agit ici de l’utilisation des MCP par intégration de ceux-ci dans les divers éléments constituants un bâtiment : enveloppes du bâtiment, plafonds, plancher, parois, menuiseries, mobiliers, etc. Le stockage et le déstockage d’énergie s’effectue au gré des échanges de chaleur avec l’air intérieur au bâtiment et l’environnement de celui-ci (air extérieur, rayonnement solaire, rayonnement nocturne, ….). Ces échanges sont passifs, c’est-à-dire non actionnés par un système mécanique, à l’exception parfois d’une ventilation nocturne forcée du bâtiment.

### II.2.1.1 – Intégration des MCP dans l'enveloppe du bâtiment

Ce type d'intégration est la plus utilisée parmi les utilisateurs passifs des MCP dans le bâtiment parce que la surface d'échange de chaleur est grande. Ils sont capables de combiner les fonctions de stockeur de chaleur et élément de construction. En général, la profondeur de l'échange de chaleur est courte. Ils sont en général installés dans les bâtiments pour contribuer à l'amélioration du rafraîchissement des résidences.

Les structures les plus fabriqués sont : les plaques de plâtres, les enduits, les murs trombes à base de MCP, les blocs de béton.

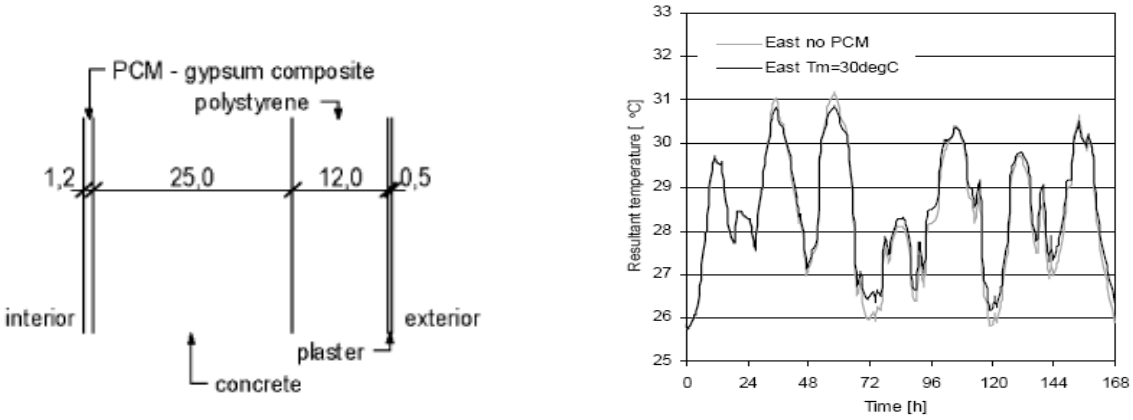
#### II.2.1.1.1 – Les plaques de plâtres-MCP

Les plaques de plâtres-MCP sont constituées en général d'un matériau de construction léger et du MCP. Les MCP les plus utilisés sont les acides gras, l'acide caprique, l'acide laurique (palmitique et stéarique), le stéarate de butyle, le dodécanol et le polythylène glycol 600 (Vineet Veer et BUDDHI, 2005) Les MCP utilisés sont en général micro encapsulés. Les plaques de plâtres-MCP sont fabriquées en général soit par immersion de la plaque de plâtre dans le MCP, soit par ajout du MCP lors de la fabrication de la plaque de plâtre. Ces plaques de plâtres-MCP sont fixées sur les murs sous la forme d'un sandwich composés d'isolant, de polystyrène et du plâtre-MCP.

La plaque de plâtre-MCP dont les travaux se sont développés est une plaque de plâtre MCP-gypse. Les travaux les plus récents sont ceux de Hein et clark, (2004). Ils ont été expérimentés sur une maison de 10 m de longueur, 5 m de largeur et d'une hauteur de 2,5 m soit un volume de 50 $m^3$. Les façades contenaient : 1,2 cm de MCP-gypse, 25 cm de béton, 12 cm de polystyrène et 0,5 cm de plâtre (Figure 5a). Les plages de température de fonte des MCP utilisée variaient de 13,3 °C à 33,3 °C, et la chaleur latente de fusion variait de 11,1 kJ/kg à 82, 4 kJ/kg.

Les résultats obtenus lors des expérimentations montrent l'effet du stockage de chaleur latente sur le comportement thermique du bâtiment (Figure 5b).

En générale, la présence de ces MCP n'entraîne pas une réduction considérable de la température du fait de la faible quantité de MCP contenu dans les murs (45 kJ/kg) lors des expériences menées par Darius et al.




*(a)* *(b)*

*Figure 5 : (a) Composition du mur par Hein et clark et (b) l'évolution de la température de la salle avec ou sans MCP. le MCP utilisé ayant une température de fusion à 30°C (d'après Hein et clark 2004).*

Malheureusement le PCM-gypse conçu pour le chauffage solaire passif fonctionne correctement seulement pendant la période printemps-automne sous certaines conditions météorologiques.

Schossig et al. (Atul et al., 2007) ont conçu un modèle de plaques de plâtre avec des microencapsulés (Figure 6) commercialisé en Allemagne.

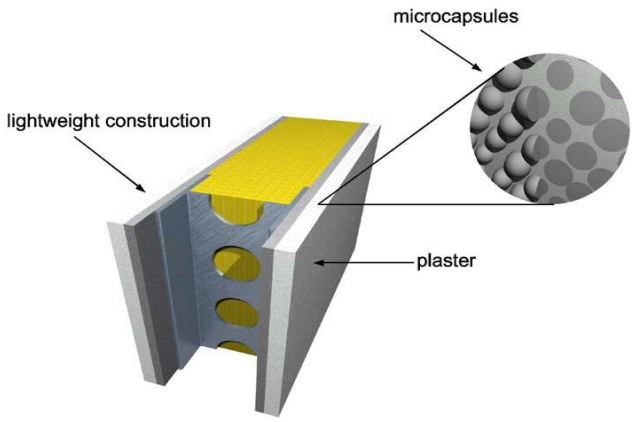



*Figure 6 : Modèle de mur contenant une Plaque de plâtre-MCP fabriqué par Schossig et al. (d'après Atul., 2007)*

### II.2.1.1.2 – 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 7).

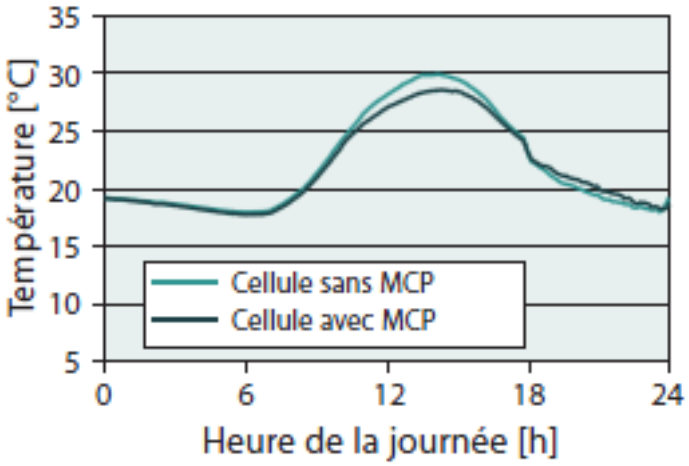



Figure *7 : Evolution des températures dans les cellules jumelées contenant de l'enduit avec et sans MCP au cours d'une journée d'été ensoleillée dans le cadre du projet RETERMAT (d'après Venstermans, 2010)*

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).

### II.2.1.1.3 – 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).

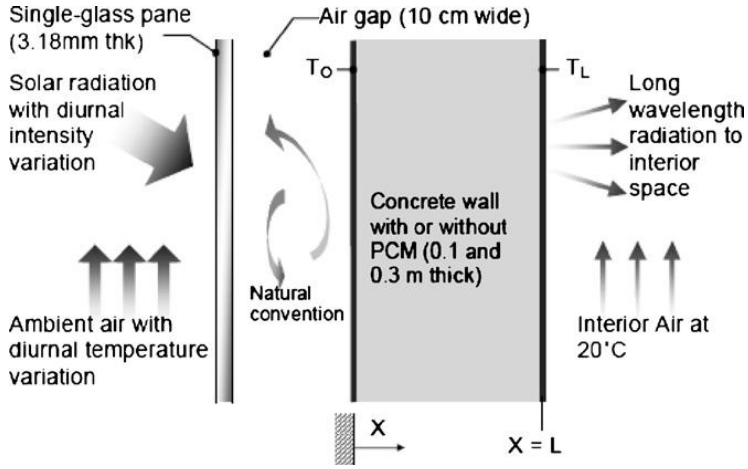



*Figure 8 : Configuration d'un modèle de mur trombe MCP (d'après Atul et al. , 2007)*

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. Ces travaux sont encore au stade expérimental (atul., 2007).

### II.2.1.1.4 – Les blocs de béton-MCP

Le centre d'étude du bâtiment (université de Concordia) à Montréal au Canada a mis au point des blocs de béton à base MCP. Ils ont utilisé différents MCP : la paraffine (PAR),

stérate de butyle (BS), dodecanol (DD) et polyethylene (PEG). Les Figure 9a et 9b représentent les capacités de stockage d'énergie ainsi que les chaleurs latentes et sensibles de quelques modèles de blocs de béton-MCP fabriqués de manière ordinaire ou en autoclave.

Au cours des différents essais sur le rendement thermique de ces blocs de béton-MCP, il ressort que les blocs de béton-MCP à base de paraffine ont la capacité de stockage d'énergie (par mètre carré) plus importantes que les autres MCP expérimentés (hawes, 1993).

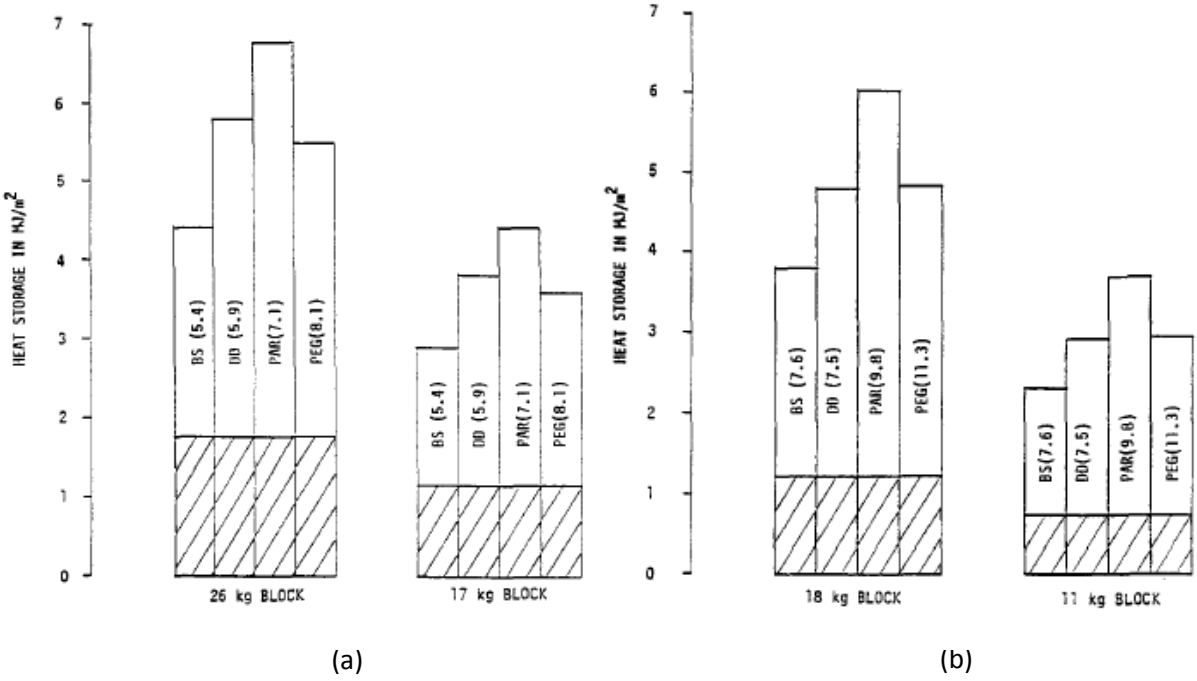



*Figure 9 : Capacités de stockage d'énergie des blocs de bétons-MCP mise au point à l'université de concordia au Canada. (a) fabrication des blocs-MCP de manière ordinaire, (b) fabrication des blocs-MCP de manière autoclave. ☐ représente les chaleurs latentes et ▨ les chaleurs sensibles. Les chiffres en parenthèses indiquent le rapport entre les poids du béton-MCP et du MCP (d'après Hawes, 1993).*

### II.2.1.2 – Autres intégrations des MCP dans le bâtiment

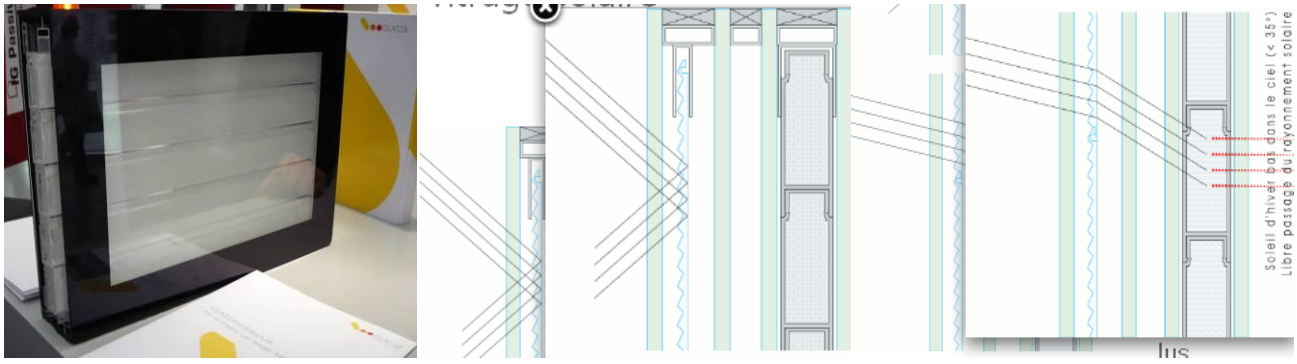
D'autres compartiments du bâtiment sont utilisés pour incorporer les MCP dans les bâtiments. La plupart sont encore au stade expérimental. Les travaux les plus avancés sont l'intégration des MCP dans les fenêtres, les rideaux de fenêtres, le plancher et le plafond.

* Les MCP dans les fenêtres

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 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 10a).

Lorsque l'inclinaison du rayonnement solaire est supérieure à 40 °C (été), il y a un réfléchissement total des rayons solaires (Figure 10b) sur la fenêtre. Lorsque l'inclinaison du rayonnement solaire est inférieure à 35 °C (hiver), les rayons solaires traversent complètement la fenêtre (Figure 10c).

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



(a) (b) (c)

*Figure 10 : 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).*

* 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) :

- 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 11) 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 11 : 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.

* 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 12a). 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 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 12b), dans les planchers et aux murs. (Pascal, 2010).




(a) (b)

*Figure 12 : 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 corréler 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 stockeur-déstockage de cette énergie.

### II.2.2 – 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 :

- 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 :

<u>Assistance au rafraîchissement des bâtiments</u>

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 rafraichi 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 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 ».

### II.2.2.1 – Les systèmes d'échangeurs Air-MCP à plaques

#### II.2.2.1.1 – Le système de Zalba et al.

Le système d'échangeur actif mis au point par Zalba et al. (2004) est un circuit d'air fermé (Figure 13a) 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 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 13b).

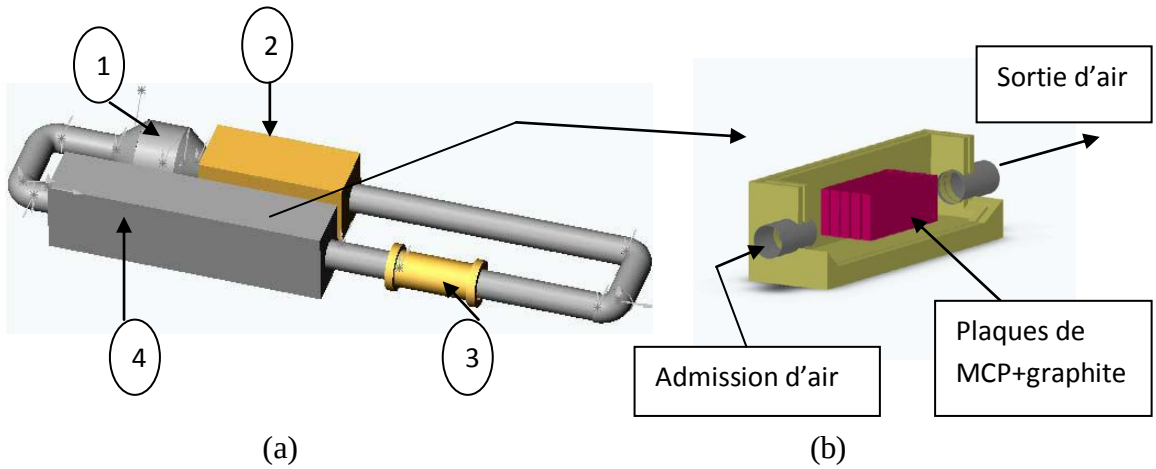



*Figure 13 : Système actif mis au point par Zalba et al. (a) dispositif expérimental (b) détail du système de stockage d'énergie. (1) ventilateur, (2) dispositif de variation de vitesses, (3) débitmètre, (4) système de stockage d'énergie.*

La vésicule d'encapsulation est en methacrylate 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% $C_{16}$ et 66% $C_{18}$, de masse volumique de 14,05 kg/$m^3$ 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/$m^3$, d'une chaleur latente de 232 kJ/kg et d'une plage de fusion comprise entre 20 °C et 24 °C.

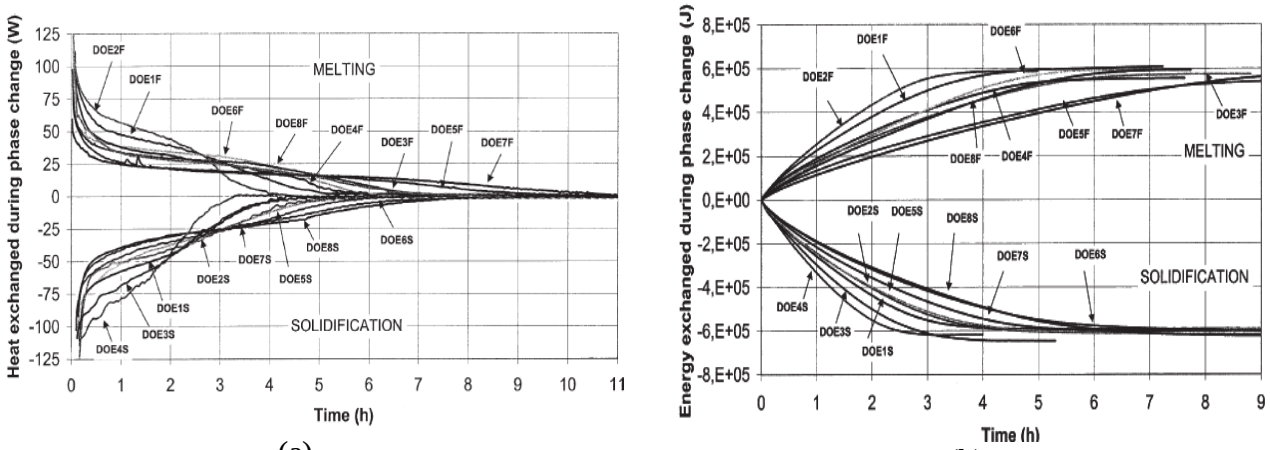
Ces deux produits sont mélangés au graphite pour former des plaques de MCP+graphite. Elles sont installées en parallèle, de plus :

- 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 $m^2/m^3$.

Les essais expérimentaux ont été réalisés pour deux types de plaques : (1) des plaques d'épaisseurs de 15 mm, d'une dimension de 460 mm x 150 mm ; chaque vésicule contenait 5 plaques. (2) des plaques d'épaisseur de 25 mm, d'une épaisseur de 460 mm x 150 mm ; chaque vésicule contenait 3 plaques. Les essais ont été effectués pour les températures d'air de 16 °C et de 18 °C pour la solidification des MCP avec des débits d'air de 100 $m^3$/h et de 150 $m^3$/h.

La Figure 14a représente l'évolution des transferts de chaleur (puissance échangée entre l'air et chacune des plaques des MCP) en fonction du temps aussi bien lors de la fusion que lors de la solidification des MCP. La Figure 14b représente l'évolution de l'énergie échangée entre l'air et les MCP lors du changement de phase pendant la fusion et pendant la solidification des MCP. En regardant ces deux figures, on constate que les processus sont plus performants lorsque l'épaisseur des plaques est de 15 mm car ils permettent d'avoir une différence de température plus élevée lors de la fusion des MCP entre l'air et les MCP. Le débit d'air est aussi plus élevé. Dans la Figure 14a, il y a des courbes qui se croisent, ceci est dû à l'interaction des autres facteurs (température de l'air et surtout différents débits d'air).

De ce fait, pour avoir un bon rendement thermique du système, il faut tenir compte de ces derniers afin d'éviter ces croissements de courbes.




(a) (b)

*Figure 14 : résultats des expériences du modèle Zalba et al. (2004). (a) évolution du transfert de chaleur entre l'air et les MCP lors de la fusion et de la solidification des MCP. (b) l'évolution de l'énergie au sein des MCP lors du changement de phase lors de la fusion et lors de la solidification des MCP. DOE1F (30°C, 100 $m^3$/h , 15 mm) , DOE2F (30°C, 150 $m^3$/h , 15 mm), DOE3F (28°C, 100 $m^3$/h , 15 mm), DOE4F (28°C, 150 $m^3$/h , 15 mm), DOE5F (28°C, 100 $m^3$/h , 25 mm), DOE6F (28°C, 100 $m^3$/h , 15 mm), DOE7F (28°C, 100 $m^3$/h , 25 mm), DOE8F (30°C, 100 $m^3$/h , 25 mm), DOE1S (18°C, 150 $m^3$/h , 25 mm), DOE2S (18°C, 150 $m^3$/h , 15 mm), DOE3S (16°C, 100 $m^3$/h , 15 mm), DOE4S (16°C, 150 $m^3$/h , 15 mm), DOE5S (16°C, 150 $m^3$/h , 25 mm), DOE6S (18°C, 150 $m^3$/h , 25 mm), DOE7S (16°C, 100 $m^3$/h , 25 mm), DOE8S (18°C, 100 $m^3$/h , 25 mm).*

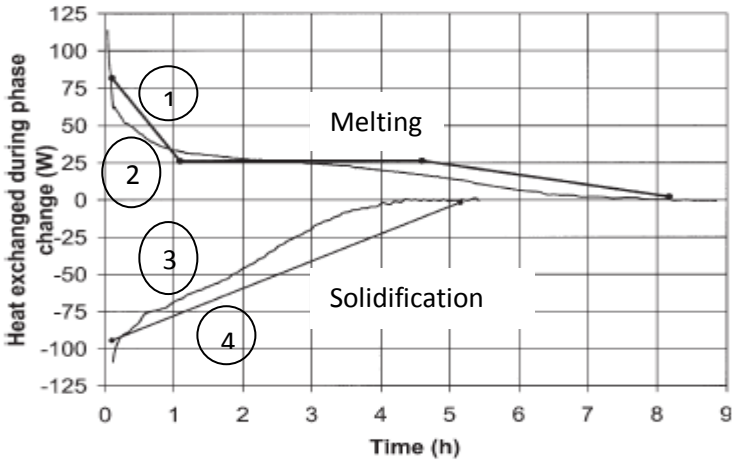



*Figure 15 : évolution moyenne des différents essais de fusion et de solidification des MCP ainsi que leurs tendances pour le modèle expérimental de Zalba (Zalba et al., 2004). (1) évolution moyenne des différents essais de fusions des MCP. (2) tendance général de fusion des MCP. (3) évolution moyenne des différentes essais de solidifications des MCP. (4) tendance général de solidification de MCP*

La Figure 15 représente les évolutions moyennes des différents essais de fusion et de solidification des MCP ainsi que leurs tendances générales. Lors de la solidification des MCP, une tendance presque linéaire peut être considérée, celle-ci étant due à l'augmentation constante de l'épaisseur de la phase solide de MCP. Cette dernière augmente la résistance thermique. Lors de la fusion des MCP, un plateau, dû à la convection naturelle après une heure de fonctionnement dans la phase liquide du MCP, est observé. Il entraine une résistance thermique constante lors du rafraîchissement ;

Le Tableau 4 présente la durée des différentes expériences de solidification et de fusion des MCP. On constate que pour les processus ayant des plaques d'une épaisseur de 15 mm sont idéales pour un système de refroidissement car la solidification des MCP se fait en moyenne en 4 heures et la fusion en moyenne en 6 h ;

Les processus ayant des plaques d'une épaisseur de 25 mm sont plus appropriés pour le fonctionnement d'un système de sécurité de température car il donne une inertie thermique en cas de dysfonctionnement de la réfrigération principale (la durée moyenne de solidification des MCP est de 6,5 heures et la durée moyenne de fusion des MCP est 9 heures).

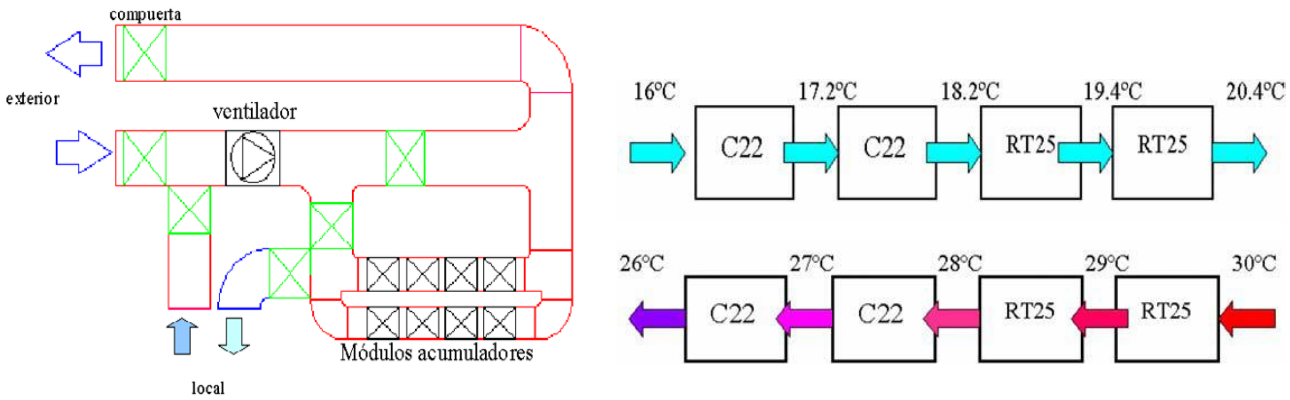
| Exp. | T° de l'air en entrée (°C) | Débit d'air ($m^3/h$) | Epaisseur des plaques MCP (mm) | Durée de la solidification (h) | | T° de l'air en entrée (°C) | Débit d'air ($m^3/h$) | Epaisseur des plaques MCP (mm) | Durée de la fusion (h) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 18 | 150 | 15 | 3,98 | | 30 | 100 | 15 | 5,66 |
| 2 | 18 | 100 | 15 | 4,91 | | 30 | 150 | 15 | 4,46 |
| 3 | 16 | 100 | 15 | 4,14 | | 28 | 100 | 15 | 7,76 |
| 4 | 16 | 150 | 15 | 3,07 | | 28 | 150 | 15 | 6,7 |
| 5 | 16 | 150 | 25 | 5,47 | | 28 | 150 | 25 | 10,26 |
| 6 | 18 | 150 | 25 | 7,24 | | 30 | 150 | 25 | 6,32 |
| 7 | 16 | 100 | 25 | 6,31 | | 28 | 100 | 25 | 11,13 |
| 8 | 18 | 100 | 25 | 7,84 | | 30 | 100 | 25 | 7,34 |

*Tableau 4 : différentes durées de solidifications et de fusions des MCP en fonction de différentes épaisseurs de plaques MCP pour le système Zalba et al.*

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

Une installation réelle a été conçue (Figure 16a). Le dispositif de stockage de l'installation avait une capacité de chargement moyenne de 3000 W et une capacité thermique nécessaire de 32400 kJ. A partir de ses données et des résultats de l'expérimentation, les MCP choisis

étaient le RT25 et le C22 (il a les mêmes caractéristiques thermiques et le même coût que le RT25). Les plaques de 15 mm ont été choisies pour un débit de 100 $m^3$/h. La solidification des MCP se faisait en 4 heures à 16 °C. La température de l'air utilisé pour la fusion était fixée à 30 °C. La vésicule de l'encapsulation avait huit encapsuleurs. Les encapsuleurs étaient disposés par paire (Figure 16b). Ils ont été conçus pour être utilisé que pendant 3 heures où 80% d'énergie est utilisé. Chaque encapsuleur avait 5 plaques rectangulaires. Au total, il y avait 40 (5 plaques x 8 encapsuleurs) plaques de MCP pour le système de rafraîchissement. Chaque plaque a une capacité thermique sensiblement de 810 kJ.




*(a)* *(b)*

*Figure 16 : Expérimentation à l'échelle 1 du modèle Zalba et al. 16a prototype du modèle expérimental, 16b disposition des encapsulateurs contenant les MCP dans la vésicule d'encapsulation (d'après Zalba et al., 2004).*

Au cours des essais, il a été constaté que la fabrication de ce système n'est pas difficile. Ce système est plus économique que les systèmes de rafraîchissement que l'on trouve sur le marché actuellement. Les auteurs envisagent améliorer le transfert de chaleur dans les MCP en utilisant une matrice de graphite poreux et des ventilateurs à vitesse variable pour réduire la consommation électrique.

### *II.2.2.1.2 – Le système de Kunping et al*

Kunping et al. (2004, 2007) ont effectué les travaux sur un système de chauffage par le plancher à base de MCP.

Le principe de fonctionnement est le suivant : de 23 heures à 7 heures on chauffe le plancher. On arrête le chauffage quand la température du plancher est à 65 °C où de 7 heures à 23 heures. De 9 heures à 16 heures, on ouvre les volets pour faire circuler par convection naturelle (système passif) où à l'aide des ventilateurs (système actif). Ce qui permet à l'air d'augmenter la température de l'air, ensuite ce dernier injecté est dans la maison. Ce qui permet de chauffer le bâtiment.

Les deux systèmes ont été expérimentés pour le chauffage d'une maison expérimentale de 3 m (longueur) x 2 m (largeur) x 2 m (hauteur) à l'université de Tsinghua entre 2004 et 2007. Cette maison avait une fenêtre de 1,6 m x 1,5 m à double vitrage donnant sud, couverte par un rideau noir. Le toit et les murs étaient composés de polystyrène de 100 mm d'épaisseur enveloppé par le métal. La structure du système comprenait : un isolant en polystyrène de 120 mm (1), les batteries de chauffage électrique (2), des plaques de MCP de 15 mm (3), des lames d'air d'une épaisseur de 50 mm (4), un recouvrement de plancher de 40 mm (5), des ventilateurs (6) avec un débit d'air de 140 $m^3$/h pour le système actif.

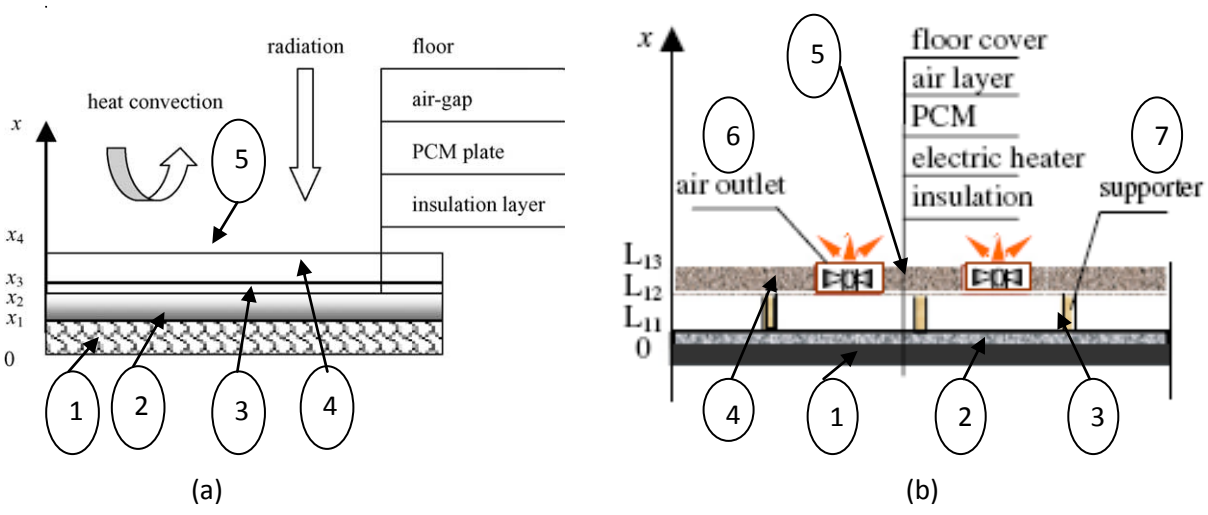



*Figure 17 : Système de chauffage mis au point par Kunping et al. (a) système passif, (b) système actif. (1) l'isolant, (2) batteries de chauffage électriques, (3) plaques de MCP, (4) la lame d'air, (5) plancher de recouvrement, (6) ventilateurs, (7) système de support de soutient du système actif (d'près kunping et al., 2004 et 2007)*

Ces différents éléments étaient soutenus par les supports (7) pour le système actif. Des plaques de MCP utilisées contenaient 75 % de paraffine et 25% de polyéthylène. Ils ont une température de changement de phase à 52°C, une chaleur de fusion de 150-200 kJ/kg et une conductivité de 0,15 W/m.C. Ils ont été mis au point par les auteurs. Les conclusions des tests étaient les suivants :

La température maximum moyenne de l'air à l'intérieur de la maison a augmenté de 8 °C avec le système actif (figure 18b) tandis que la température de la nuit a été maintenue. La température des MCP était toujours à 45°C c'est-à-dire que la consommation électrique a été déplacée de la période grande consommation vers la période petite consommation. Ce qui permet de réduire les coûts de consommation électrique en raison de la tarification de l'électricité entre le jour et la nuit. Cependant, la maison expérimentale est construite avec les matériaux légers, de ce fait, la faible capacité thermique de cette maison a provoqué une grande variation de température à l'intérieur de la maison. Les applications de tels systèmes dans les bâtiments conventionnels et les différentes régions climatiques restent à prouver.

### II.2.2.1.3 – Le système de Hed et Bellander

Hed et Bellander (2005) ont mis au point un système actif de rafraîchissement à base de MCP. La Figure 18a représente le principe de fonctionnement de la journée où l'air chaud circule dans le système pour fusionner les MCP et l'air rafraîchit issu du système permet d'améliorer le confort thermique de la maison. La Figure 18b représente le principe de fonctionnement nocturne où nous avons deux entrées d'air : l'une pour solidifier les MCP et l'autre pour aérer la maison.

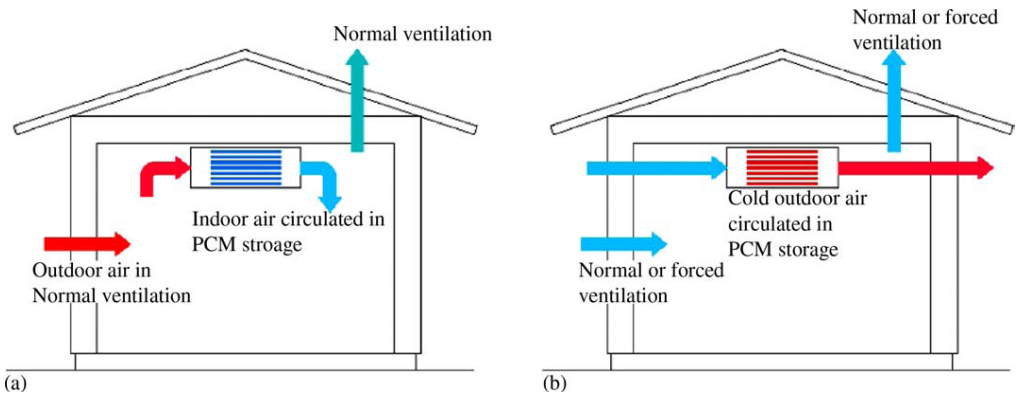



*Figure 18 : Principe de fonctionnement du système Hed et al (d'après Hed et bellander, 2005), (a) fonctionnement diurne et (b) fonctionnement nocturne.*

Un prototype de cet échangeur a été conçu (Figure 19a). Les MCP sont stockés dans six sachets de 80 mm x 160 mm avec une épaisseur de 8 mm. Ils sont empilés dans un périmètre

de 1,92 m. ils ont un poids total de 20 kg. Le débit d'air est 62 l/s, l'entrefer entre les couches est de 8 mm (Figure 19b et Figure 19c). Le MCP utilisé est le sel Glauber ($Na_2SO_410H_2O$). Sa capacité de stockage est de 10 kJ/kg.K dans l'intervalle de température de 18 °C à 28 °C. Sa conductivité thermique est de 0,5 W/m$^2$K. La vitesse de l'air entre les couches de MCP est de 4 m/s.

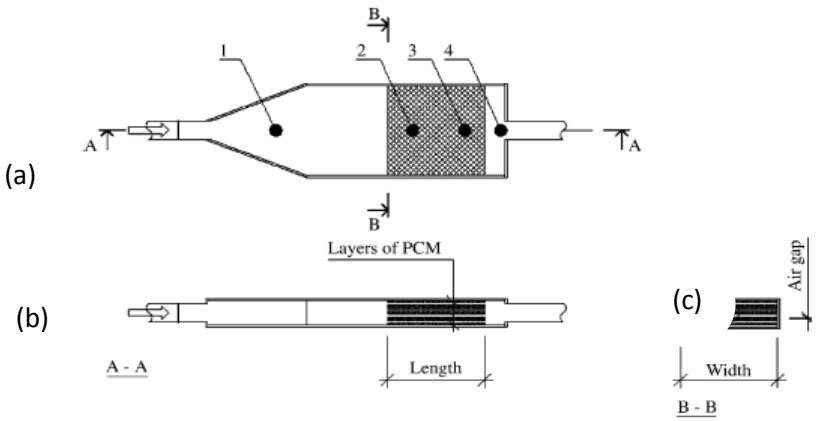



*Figure 19 : Schéma de l'échangeur air-MCP mis au point par Hed et Bellander (a) la vue de face, (b) coupe A-A et (c) coupe B-B. 1,2,3,4 les points de mesure des températures (d'après Hed et Bellander, 2005)*

Au cours de l'expérience, la température de l'air à l'entrée de l'échangeur a été maintenu constante à 19 °C au cours de la nuit et de 27 °C au cours de la journée. Les temps des intervalles ont été choisis afin d'obtenir une température stable dans les MCP. La Figure 20 représente l'enregistrement de température typique en sortie de l'échangeur (mesure au point 4) pour une période de 24 heures.

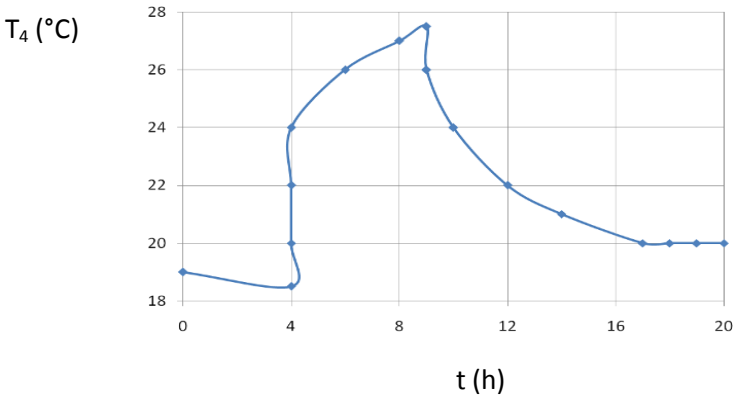



*Figure 20 : évolution de la température de l'air en sortie de l'échangeur (point de mesure 4, cf figure 19) mis au point par Hed et Bellander.*

### II.2.2.1.4 – Le système Turnpenny et al.

Turnpenny et al. (1999, 2000) ont mis au point un système de chauffage composé d'un certain nombre de caloducs contenant des MCP disposées en cercle monté près du plafond sur un support avec un ventilateur au centre du cercle (Figure 21).



*Figure 21 : Système de rafraîchissement actif conçu par Turnpenny et al. montrant les caloducs sous le ventilateur (d'après Turnpenny, 2000).*

Le principe de fonctionnement est le suivant : la nuit (Figure **22**a), on ouvre les volets. L'air frais de l'extérieur est aspiré. Une partie de cet air va circuler au tour des caloducs, ce qui va permettre aux MCP se solidifier. Cet air ensuite évacué vers l'extérieur à l'aide d'un extracteur d'air. L'autre partie de l'air va permettre d'aérer la salle. La journée Figure 22b), les volets sont à peine fermés, l'air chaud de la salle est tiré sur les extrémités des caloducs. Elle va circuler le long des caloducs.

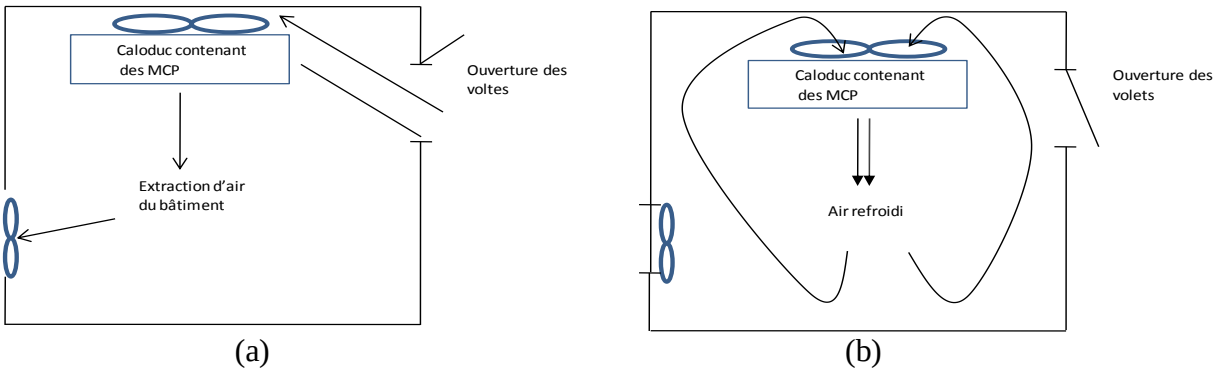



*Figure 22 : principe de fonctionnement du système de rafraîchissement conçu par Turnpenny. (a) fonctionnement nocturne. (b) fonctionnement de la journée*

Cet air va se rafraîchir faisant fondre les MCP. Ensuite, on fait circuler cet air frais dans la salle. Les plaques de MCP contiennent du sel $Na_2SO_4.10H_2O$ dont la température de fusion est 21 °C. Ce MCP a une chaleur latente de fusion de 198 kJ/Kg pour une conductivité de 0,55 W/m.K. Chaque caloduc a 20 plaques de 450 x 50 mm pour une épaisseur de 1 mm. Ils ont une masse de 4,8 kg et sont disposés à tous les angles de 18° autour d'un axe. À l'Université de Nottingham, les essais ont été réalisés dans une salle de 6 m x 4,8 m pour une hauteur de 2,5 m. La température extérieure était de 25°C pendant la journée et de 11 °C à 17°C pendant la nuit (Turnpenny et al., 1999 et 2000). Les essais ont été réalisés pour les cycles de rafraîchissement de 1 KW et de 2 KW pendant 24 heures.

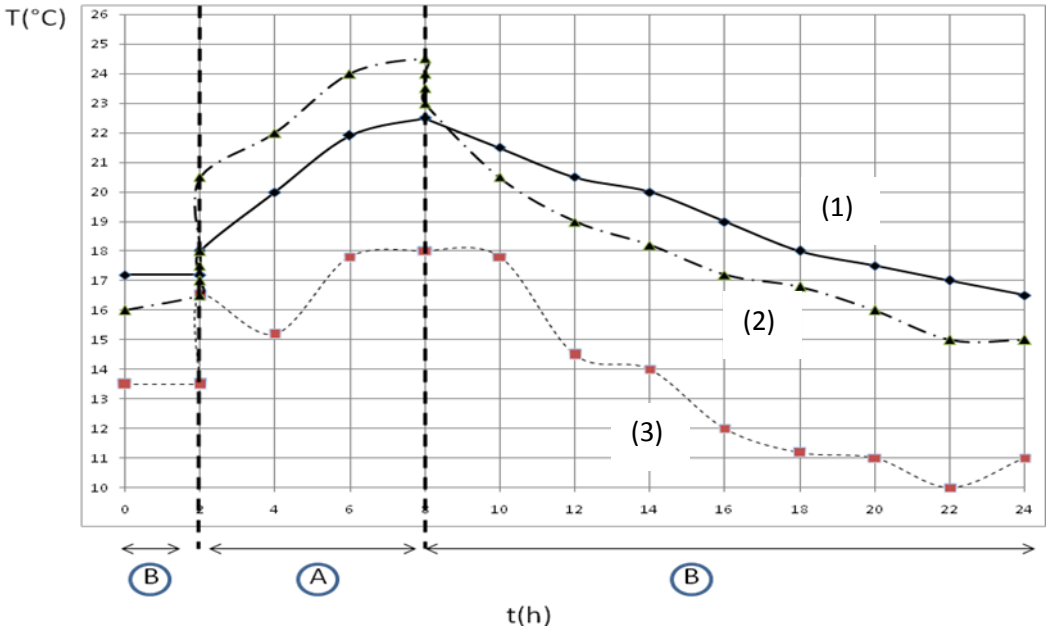



*Figure 23 : Evolution des températures d'une salle expérimentale du système de Turnpenny pendant 24 heures. (1) température de l'air extérieur à la salle expérimentale (2) température du MCP et (3) température de l'air intérieur de la salle expérimentale, (A) phase de fusion des MCP, (B) phase de régénération des MCP (d'après Turnpenny et al, 2000).*

Les courbes de la Figure 23 représentent l'évolution des températures de l'air extérieur de la salle expérimentale (1), les températures des MCP (2) et les températures de l'air dans la salle expérimentale (3). La zone (A) représente la phase de fusion des MCP. La zone (B) représente la phase de solidification des MCP. Quand la température de l'air de la salle expérimentale (T3) est comprise entre 22°C et 24°C, nous avons une fusion complète des MCP. Cette fusion met 6 heures environ pour T3-T2 = 2°C. Quand T3-T2 = 3,5°C, elle met 3 heures. La solidification se fait en moyenne en 5 heures.

#### II.2.2.1.5 – Analyse comparative et conclusions

Le tableau 4 récapitule les avantages et les inconvénients des systèmes d'échangeurs actifs d'air-MCP à plaques dont les travaux sont assez publiés. Lorsque l'on regarde ce tableau, on constate que la plupart des auteurs ont mis au point les MCP utilisés dans leurs systèmes. Sauf Zalba qui utilise deux types de MCP que l'on trouve sur le marché.

La plupart des en capsuleurs sont faciles à réaliser. Sauf le système de Kunping et al. où il faut mettre d'abord les MCP dans les sachets avant de les installer dans l'en capsuleur ce qui peut entraîner un investissement plus important. Le système Hed et Bellander est le seul où on ne peut pas stocker une quantité importante de MCP.

L'échangeur de Zalba et al. peut intégrer facilement un système simple car, en général c'est un boitier rectangulaire. Le système Kunping oblige d'avoir un plancher qui puisse permettre d'installer un certain nombre d'accessoires. Les plus difficiles à intégrer sont ceux de Hed et de Turnpenny et al. car les encapsuleurs des MCP sont spécifiques.

Le système Turnpenny et al. a la meilleure compacité car toutes les surfaces des plaques de MCP sont en contact avec l'air de ce fait, elle a une grande surface d'échange thermique pour un petit volume d'échange. Les systèmes Zalba et Hed ont un échange thermique unidirectionnel. Elles se font sur les deux plus grandes surfaces des plaques rectangulaires. Mais la compacité du système de Zalba est mieux que le système Hed et Bellander car il a un petit volume d'échange. La compacité du système de Kunping est la plus petite de tous les systèmes inventoriés, l'échange thermique de MCP et l'air se fait que sur une seule surface de plaques des MCP, même si ce système à une grande surface d'échange thermique et que l'épaisseur des MCP est grande (50 mm), mais son volume d'échange thermique est aussi grand. De ce fait, l'échange thermique n'est pas maximisé.

Les travaux sur l'amélioration de la conductivité ne sont menés que sur le dimensionnement de l'encapsuleur et non sur les MCP pour les auteurs à part le système Zalba et al. qui mélange les MCP au graphite afin d'améliorer la conductivité.

Pour la plus part des systèmes, on n'a pas d'informations sur le fonctionnement des systèmes lors de régénération des MCP et sur les coûts du projet alors que ce dernier est un paramètre très important car en fonction du budget alloué, on est obligé de faire certains choix notamment sur les solutions technologiques du système.

Les premiers résultats des applications réelles des systèmes Kunping et al. et Turnpenny et al. sont encourageants sur le rafraîchissement des bâtiments. Ils arrivent à réduire de 2-4° C les températures de l'air des sites expérimentaux.

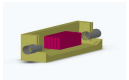
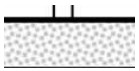
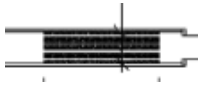
| Critères | Systèmes d'échangeur de chaleur Air-MCP à plaques | | | |
|---|---|---|---|---|
| | Zalba et al.  | Kunping et al  | Hed et Bellander  | Turnpenny et al.  |
| Choix de MCP | Deux types de MCP ont été testés RT25 et C16 C18. | Un seul type de MCP a été testé, ils ont été mis au point par les auteurs. | | |
| Encapsulation des MCP | Facile. Les plaques sont installées dans un boitier. | Difficile. Les MCP sont installées dans les sachets ensuite dans le plancher. | Facile. Les couches de MCP sont installées dans un boîtier. | Difficle. Les plaques de MCP sont fixées sur des caloducs. |
| Contenant des MCP encapsulé | Importante. | Importante. | Limitée à cause de la configuration rectangulaire du contenant. | Limitée parce qu'on ne peut que mettre un nombre limité des caloducs dans le plafond. |
| Intégration de l'échangeur dans le système | Aisée. | Aisée. | Peu aisée car l'échangeur doit être de forme rectangulaire pour être installé dans le système | Aisée. |
| Intégration du système dans le bâtiment | Peut s'installer à différents endroits de la maison. | Seulement dans les planchers. | Seulement dans le plafond. | |
| Echange thermique air-MCP | Unidirectionnel et échange thermique air-poche en aluminium- MCP. | Bonne et échange thermique air-contenant des MCP-MCP. | Unidirectionnel et échange thermique direct air- MCP. | Bonne et échange thermique air-contenant MCP -MCP. |
| Compacité ($m^2/m^3$) | 25,31 | 20,1 | 12,5 | 27,1 |
| Contrôle de l'échange thermique | Pas assez de contrôle de l'échange thermique. | | | |
| Coût | Les MCP représentent 17% du coût total. | Pas de données les différents coûts. | | |
| Application réelle | Pas assez d'information sur les essais à l'échelle1. | Résultats encourageants pour les essais à l'échelle 1. | Pas d'expériences à l'échelle1. | Résultats encourageants pour les essais à l'échelle 1. |

*Tableau 5 : Analyse des systèmes d'échangeur de chaleur Air-MCP à plaque dont les travaux sont assez publiés*

### II.2.2.2 – Les systèmes d'échangeurs de chaleur Air-MCP en "amas"

#### II.2.2.2.1 – Le système d'Arkar et al.

Le système d'Arkar et al. (2005, 2007) est un système de refroidissement composé d'un système de ventilation mécanique, d'un système de stockage thermique LTHES (Latent Heat Thermale Energy Storage) et d'une unité de contrôle. Le LTHES est un cylindre contenant de petites sphères encapsulées de MCP de RT 20. Ce MCP est vendu par Rubitherm. L'optimisation du LTHES a été faite à partir de certains paramètres notamment : les caractéristiques des MCP, le ratio masse du MCP et le débit volumique d'air, le ratio longueur de l'échangeur (L) sur diamètre (D) de l'échangeur. L'hypothèse de la modélisation des LTHES est que les sphères se comportent comme un milieu continu et non comme un noyau composé de particules indépendantes. Le fonctionnement est suivant : Lorsque la température de l'air extérieure ambiante (Ta) est supérieure à la température de fusion des MCP (To), en général la journée, les MCP contenu dans les sphères fusionnent, ce qui permet au bâtiment d'être rafraîchi grâce à l'air provenant des LTHES (Figure 24a). Lorsque la température extérieure ambiante (Ta) est inférieure à la température de fusion des MCP (To) (en général la nuit), le bâtiment est rafraîchi par l'air de l'extérieur. En même temps, les MCP contenus dans les sphères se solidifient (Figure 24b).

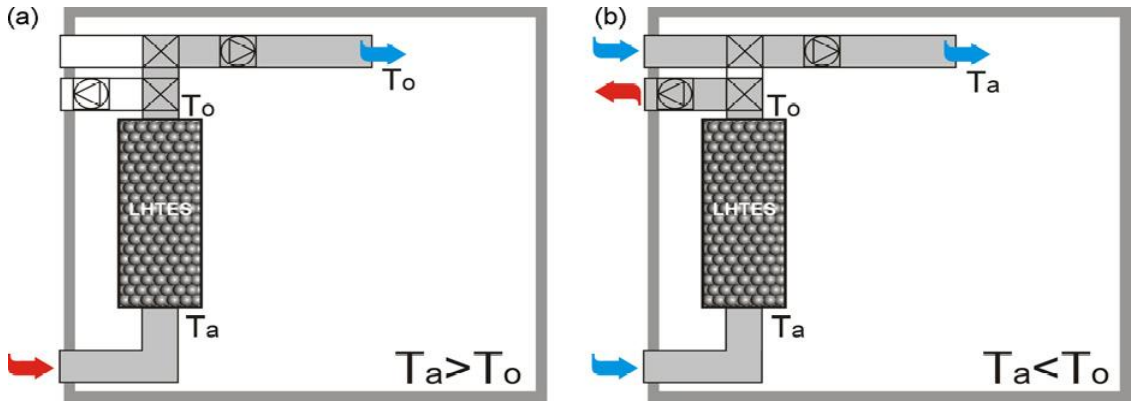



*Figure 24 : Principe de fonctionnement du système mis au point par Arkar et al. (a) fonctionnement diurne, (b) fonctionne nocturne. (To) température de l'air à la sortie du système, (Ta) température de l'air à l'entrée du système (d'après Arkar et al., 2007)*

La Figure 25 représente le prototype de l'échangeur d'Arkar et al. Le stockage de chaleur est un cylindre de diamètre 0,34 m et d'une hauteur de 1,52 m. Elle a 35 rangées de sphères structurées, d'un diamètre de 50 mm et d'une épaisseur de 1 mm. Ces derniers sont remplis de MCP de type RT 20. Le garnissage en moyenne de porosité est de 0,388.



*Figure 25 : Système de rafraîchissement mis au point par d'Arkar et al. (d'après Arkar et al, 2005, 2007).*

Les essais de cet échangeur ont été réalisés celui-ci étant intégré dans un immeuble à deux étages de 191 $m^2$ de surface habitable pour un volume de 430 $m^3$. Ces essais ont été effectués pour un taux de renouvellement de 1 volume/heure et pour un taux de renouvellement de 2 volumes/heure. Les températures de l'air extérieur de l'immeuble (Ta) ont été mesurées pour une période de 10 jours lors des périodes les plus chaudes. Les essais ont démontré que le taux de renouvellement d'air a un impact sur le rendement thermique du système ; plus on renouvelle l'air, plus la température de l'air du bâtiment diminue. Nous avons une différence à peut prêt de 2°C entre le taux de renouvellement de 1 volume/heure et de 2 volumes/heure. Le système permet d'avoir des réductions de température d'air à l'intérieur du bâtiment importantes. L'écart de température entre les deux taux de renouvellement est presque le même quelque soit la température de l'air extérieur.

La Figure 26 présente le taux de changement de température de paraffine au centre de deux sphères lors de la solidification. La Figure 27 présente le taux de changement de température lors de la fusion des MCP. Dans ces deux figures on observe le décalage lors du démarrage et la fin lors de la fusion et de la solidification des MCP. Dans la Figure 26, le premier pic représente le refroidissement sensible du MCP liquide. Ensuite il y a une période où la

température est constante. Une autre augmentation du taux de la température apparait lorsque la température du MCP descend en dessous de la température du pic et commence à l'approche de la température de l'air. Ce second pic correspond à la chaleur sensible de la paraffine solide. Lors de la fusion des MCP dans la Figure 27, le premier pic représente le début du MCP solide. Le taux de changement de température diminue quand la température de MCP se rapproche du pic de la température. Un pic supérieur à 0,5 K/mn représente le moment où la phase solide se sépare du thermocouple de mesure. En raison de la différence de la densité entre les phases solide et liquide, le MCP solide se dépose au fond de la sphère au cours de la fusion, de sorte que le processus de fusion est similaire à la phase où le MCP à est moitie solide et à moitié liquide. Le petit pic pourrait être décrit comme une invasion de la paraffine liquide dans un pore de la paraffine solide. Le pic après la séparation du thermocouple et le MCP repésente le chauffage de la paraffine liquide. A partir de ses figures, on peut conclure que, même à des débits plus élevés, les taux de la température du MCP changent légèrement et pour une courte durée de 0,1 K/mn, et que les taux élevés de changement de température sont réalisés à l'entrée du système (Arkar et al.).

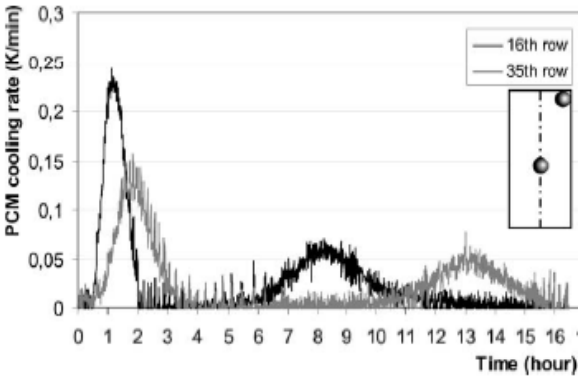



*Figure 26 : taux de changement de température des MCP lors de la solidification (le débit d'air étant 76 $m^3$/h) pour le système d'Arkar et al.*

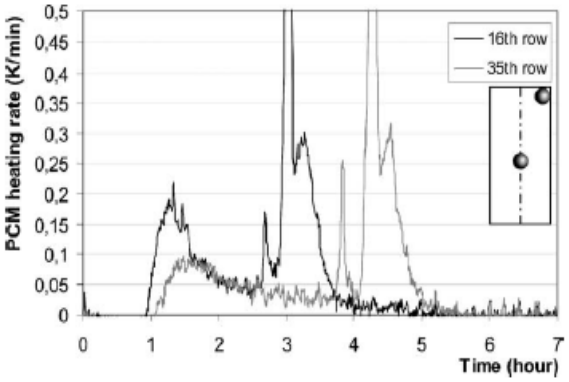



*Figure 27 : taux de changement des MCP lors de la fusion des MCP (le débit étant de 215 $m^3$/h) pour le système d'Arkar et al.*

Il a été également démontré que le ratio longueur de l'échangeur (L) sur le diamètre de l'échangeur (D) à une grande influence sur la réponse thermique du système actif. Le rapport optimal entre la masse du MCP et le débit d'air à travers le volume LTHES doit être compris entre 1 et 1,5 kg/$m^3$/h pour que le système puisse bien fonctionner. En général, on n'utilise que 85%-95% de la masse totale du MCP.

### II.2.2.2.2 – Le système de Takeda et al.

Le système de rafraîchissement mis au point par Takeda et al. (2004) est un parallélépipède rectangle de 140 mm x 140 mm x 900 mm avec 100 mm d'épaisseur de panneaux d'isolation thermique. Les PCM utilisés sont en granulés de diamètre de 1-3 mm et sont constitués de 65% de matériaux en céramique et 35% de MCP (d'hydrocarbures de paraffines) en poids. Les MCP ont une chaleur latente de 41,9 kj/kg, une conductivité de 0,13 w/m/K (à 15,2°C) pour la phase solide et de 0,129 w/m/K (à 42,2°C) pour la phase liquide. La température de début de fusion des MCP est supérieure ou égale à 24,9 °C et la température de début de solidification des MCP est inférieure ou égal à 23,5°C (hystérésis). Ils sont fabriqués par Rubitherm ®. Ce lit de MCP est installé au centre d'une conduite d'alimentation d'air.

Les expériences ont été effectuées en faisant varier la température d'entrée d'air périodiquement. La Figure 28 représente les résultats de deux cycles lorsque la température d'entrée de l'air varie entre 21,5 °C et 28 °C. Ces mesures sont réalisées à des profondeurs de 3,9 cm ; 15 cm ; 21 cm et 27 cm. Les résultats expérimentaux montrent que la température d'air augmente et le taux de changement diminue entre 22 °C et 24 °C. D'autre part, lorsque la température de l'air diminue, les valeurs de chaque point de mesure restent à 25,2 °C pendant une certaine période. Ceci est causé par la fusion et la solidification des MCP. Ces températures sont proches de la plage de changement de phase qui est de 23,5 °C - 24,9 °C.

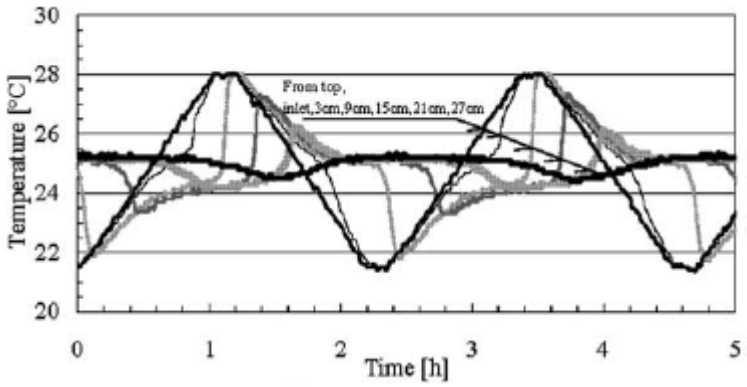



*Figure 28 : variation de températures déterminées expérimentalement pour le système mis au point par Takeda et al (Takeda et al., 2004)*

Takeda et al. ont mis au point un modèle 1D d'échange thermique entre l'air traversant la cellule de granulés de MCP et ces granules (Figure 29a), considérant l'uniformité de la température du MCP dans chaque granulé. Des tests numériques de ce système de

refroidissement ont été réalisés pour huit villes du Japon (Sendai, Tokyo, Kohfu, Kanazawa, Kyoto, Nara, Fukuoka, Naha) selon la configuration de la Figure 29b. Le système avait deux modes de fonctionnement dénommés Système 1 (sys.1) et Système 2 (sys.2).

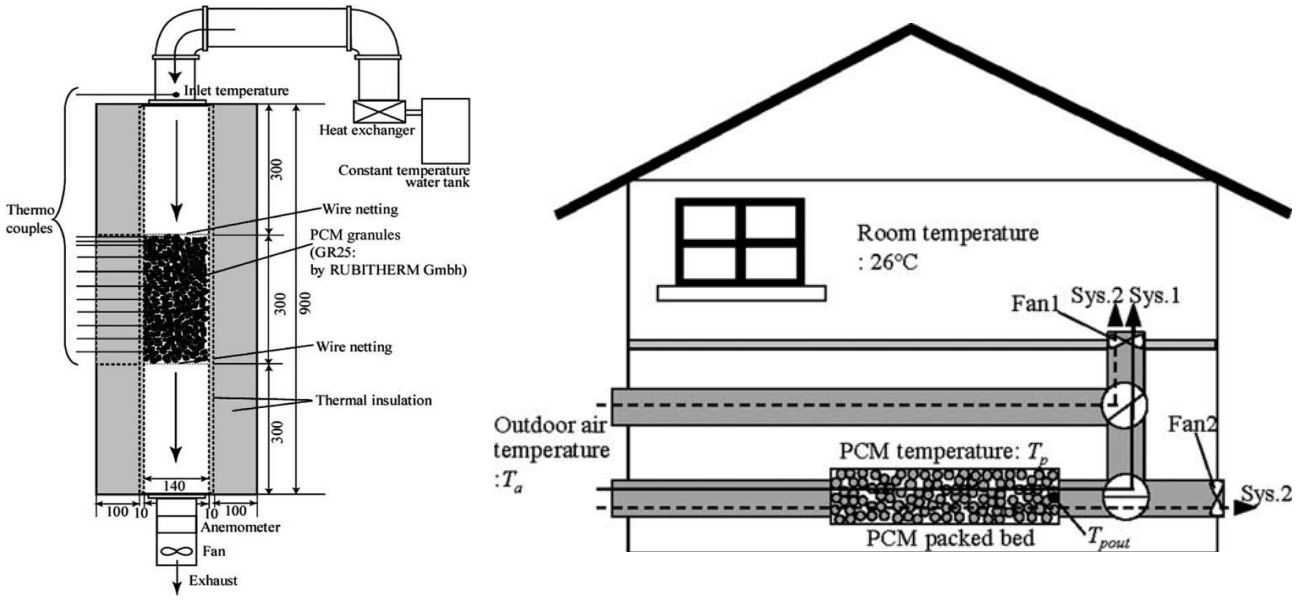



*Figure 29 : Système de rafraîchissement mis au point par Takeda et al. (a) dispositif expérimental de test en laboratoire et (b) schéma du système mis en place lors des essais sur un bâtiment expérimental (d'après Takeda, 2004).*

La température de consigne pour la température d'air intérieur du bâtiment expérimental a été fixée à 26 °C pour le pilotage du système de refroidissement. Quelque soit le mode de fonctionnement, la cellule de refroidissement contenant les MCP recevait toujours de l'air de l'extérieur. Les deux modes de fonctionnement sont indiqués dans le Tableau 6 :

| | Ta > 26°C | | Ta < 26°C |
|---|---|---|---|
| | Tp out ≤Ta | Tp out > Ta | |
| Mode de fonctionnement | Sys.1 | Sys.2 | Sys.2 |
| Ventilateur 1 | marche | marche | marche |
| Ventilateur 2 | Arrêt | marche | marche |

*Tableau 6 : Principe de fonctionnement du système Takeda et al. (Ta) température de l'air à l'extérieur du bâtiment expérimental, (Tp) température de l'air à la sortie du système (Takeda et al., 2004)*

La température de la salle est réglée à 26°C pour le refroidissement. Lorsque la température de l'air extérieur est inférieure à 26°C, le système Sys.2 est activé et l'énergie est stockée dans les MCP. D'autre part quand Ta est supérieur à 26°C et la température de sortie Tp est

inférieur à Ta, le système Sys1 est sélectionné. En outre, lorsque Ta est supérieur à 26°C et Tp est au-dessus de Ta, l'air extérieur est fournis directement à la salle (Takeda et al., 2004).

Les conclusions des auteurs sur leurs systèmes de stockage d'énergie en amas sont les suivantes : selon les conditions météorologiques rencontrées et le choix de MCP retenu, l'efficacité en termes de réduction des besoins de rafraîchissement peut être très importante, allant même jusqu'à réduire de 2/3 ceux-ci, ceci sous un climat similaire à celui rencontré en Europe continentale.

#### II.2.2.2.3 – Analyse comparative et conclusions

Le Tableau 7 récapitule les avantages et les inconvénients des systèmes actifs dont les MCP sont en amas pour lesquels les travaux sont assez publiés. On constate le principe de fonctionnement est le même pour les deux systèmes. On constate qu'il n'y a que le système d'Akar et al. qui ont expérimentés plusieurs types de MCP. Le système de Takeda et al. utilise qu'un seul type de MCP qui est un mélange paraffine et matériaux en céramique.

Dans le système Takeda, l'intégration de l'échangeur dans le système est un peu difficile car il faut installer les MCP au milieu des parallélépipèdes rectangulaires et il ne peut que s'installer que sous un plancher d'après l'auteur. Le système Takeda et al. a le meilleur contrôle du fonctionnement d'un système que celui d'Arkar et al. car le système Takeda et al. fonctionne avec un monitoring qui tient compte des variations des températures à l'instant t. Ce qui permet de réduire la consommation d'électricité.

La ration « masse de MCP/débit » du système d'Arkar et al. est 16 fois plus important que celui du système takeda et al. Les travaux sur l'amélioration de la conductivité ne sont abordés que pour le dimensionnement des contenants de MCP et non sur les MCP.

Les premières expériences à l'échelle 1 de ses deux systèmes sont encourageantes. Les travaux sur le système Takeda et al. se poursuivent pour être adaptés à différents environnements.

On n'a pas d'informations sur les différents coûts du projet alors que c'est un paramètre très important tant sur le choix des solutions technologiques du système que sur l'investissement du projet.

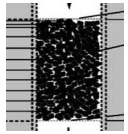
| Critères | Systèmes d'échangeurs Air- MCP en amas | |
|---|---|---|
| | Arkar  | Takeda et al  |
| **Choix de MCP** | **Différents types de MCP ont été testés.** | **Un seul type de MCP a été testé : 35% MCP+65% matériaux en céramique.** |
| **Encapsulation des MCP** | **Pas aisée. Les MCP sont encapsulés dans les sphères.** | **Aisée. Les MCP granulés sont encapsulés dans une matrice céramique.** |
| **Contenant des MCP encapsulé** | **Un peu limité. Il faut respecter le ratio L/D ≈ 1,5** | **Importante.** |
| **Intégration de l'échangeur dans le système** | **Aisée.** | **Peu aisée. Il faut installer les MCP au milieu d'un parallélépipède rectangle.** |
| **Intégration du système dans le bâtiment** | **Peut s'installer à différents endroits de la maison.** | **Seulement dans les planchers d'après l'auteur.** |
| **Ratio « masse de MCP/débit »** | **1 - 1,5 kg/** $m^3$**/h** | **0,09 kg/** $m^3$**/h** |
| **Echange thermique air-MCP** | **Bonne échange thermique air-sphère-MCP.** | **Bonne échange thermique direct air-céramique-MCP.** |
| **Coût du système** | **Pas de données sur les différents coûts.** | |
| **Application réelle** | **Résultats encourageants pour les essais à l'échelle 1.** | |

*Tableau 7 : Analyse des systèmes d'échangeurs Air-MCP sphériques ou à granulés*

### *II.3 – Bilan et conclusion*

Dans ce paragraphe, nous avons présenté un panorama détaillé des utilisations passives et actives de Matériaux à changement de Phase (MCP) en bâtiment les plus développés dont les résultats sont assez publiés. Dans un premier temps nous avons fait l'inventaire des systèmes de stockage d'énergie à MCP passifs. Nous avons constaté que les principaux problèmes des systèmes passifs sont : la limitation par la quantité de MCP utilisée (en général 25% du poids du matériau) et la difficulté à gérer à bon escient les échanges thermiques au sein d'un bâtiment.

Ensuite nous avons exploré les systèmes de stockage d'énergie à MCP actifs. Nous avons constaté qu'il y a deux grandes familles de systèmes actives : les systèmes contenant des MCP en plaque et ceux contenant des MCP en amas.

Lorsqu'on regarde le Tableau 8 on constate que les systèmes actifs en plaques ont des échangeurs faciles à fabriquer.

Au niveau du transfert de chaleur. Les auteurs des systèmes actifs ayant des MCP en "amas" estiment leurs échangeurs thermiques ont un bon transfert de chaleur. Car ils partent du principe que l'ensemble des petites sphères ou granulés contenant des MCP forme une surface d'échange thermique plus grande (par kg de MCP) que les systèmes à MCP en plaques où le transfert de chaleur est unidirectionnel la plus part du temps. Lors du changement de phase, pour les systèmes actifs à MCP en plaques, le MCP se solidifie autour des bords de l'en capsuleur. Ceci réduit le transfert thermique des échangeurs.

Malheureusement, les travaux sur les systèmes actifs ayant des MCP en amas ne sont pas estimés financièrement. Ceci nous aurait permis de comparer l'impact économique des systèmes passifs et les systèmes actifs.

| Paramètres | Utilisation passive des MCP | Utilisation active des MCP | |
|---|---|---|---|
| | | **MCP en plaque** | **MCP en amas** |
| Choix de MCP | différents MCP sont expérimentés | Il n'a que Zalba et d'Arkar qui ont expérimentés différents types de MCP. Pour les autres, les MCP utilisés sont conçus par les auteurs. | |
| Encapsulation des MC | Faciles. Ils intègrent en général les différents compartiments du bâtiment. | La plupart sont faciles à concevoir. | |
| Contenant des MCP encapsulés | Limitée. | Importante pour la plupart. | |
| Intégration de l'échangeur dans le système | Facilement. | Difficilement en général. | |
| Intégration du système dans le bâtiment | Facilement. | | Difficilement en général |
| Echange thermique air-MCP | Pas bon et l'échange thermique n'est pas contrôlé. | Bon échange thermique. Elle est indirect air-contenant MCP/MCP pour la plupart. | |
| Contrôle de l'échange thermique | Pas bonne. | Bonne pour la plupart. | Pas bonne pour la plupart. |
| Coût du système | On n'a pas assez d'information pour la plupart des expérimentations. | | |
| Application réelle | La plupart des expérimentations à l'échelle 1 ont des résultats encourageants. | | |

*Tableau 8 : Comparaison de certains paramètres des échangeurs passifs et actifs dont les résultats sont assez publiés.*

L’objectif de nos travaux de thèse est de concevoir, dimensionner et fabriquer un système qui permettra de rafraîchir une maison qui participait au concours Solar Décathlon Europe 2010. Ce système devra aussi permettre de participer au stockage de chaleur en vue du chauffage de cette maison.

Dans ce chapitre, nous avons constaté, en ce qui concerne le matériel (équipement), lorsque l’on utilisé les MCP en vrac pour un système donné, il convient d’utiliser les plaques et lorsqu’on estime qu’il faut utiliser les MCP encapsulés, il est préférable d’utiliser les amas. De même que le coût d’un système contenant les MCP en vrac est inférieur à un système contenant les MCP encapsulés et qu’un système ayant des MCP en vrac encapsulés dans les plaques permet de limiter les pertes de charge.

Fort de ces constants, nous avons décidé concevoir, dimensionner et fabriquer un échangeur à plaques. Les MCP seront en vrac. Ces derniers seront macro-encapsulés.

Avant de vous présenter le processus que nous avons retenu pour mener à bien la conception, le dimensionnement et la fabrication du système à l’échelle 1, nous allons d’abord vous exposer le contexte dans lequel ses travaux se sont déroulés.

## III – Contexte partenarial de développement : le concours international Solar Décathlon Europe 2010 (SDE 2010)

### *III.1 – Présentation du SDE 2010*

Le Solar Decathlon est une compétition universitaire internationale organisée en 2002, 2005, 2007 et 2009 par le Département de l'Energie Américain à Washington. Elle a pour but de développer la transmission des savoirs et de la recherche dans le domaine de la construction de bâtiments durables, notamment la construction de maisons solaires à énergies positives.

Le défi proposé à des universités du monde entier est de dessiner, concevoir puis construire une maison solaire qui produit plus d'énergie qu'elle en consomme tout en offrant un design contemporain et un confort de vie élevé. Chaque projet est évalué et testé par le jury selon 10 critères d'où la référence à l'épreuve olympique : Développement durable, Innovation, Ingénierie et Construction, Conditions de confort, Systèmes solaires, Architecture, Balance énergétique, Equipements, Communication et diffusion du savoir, Industrialisation et viabilité économique.

En 2007, le gouvernement espagnol a signé un accord de coopération avec celui des Etats-Unis pour l'organisation d'un Solar Decathlon Europe (SDE) pour les années paires, en alternance avec le Solar Décathlon aux USA. La première compétition européenne s'est déroulée en juin 2010 sous la forme d'un salon à ciel ouvert en plein cœur de Madrid, sur les bords de la rivière Manzanares. L'édition européenne se distingue de la version américaine notamment mettant en avant les critères "Innovation" et "Développement durable". Cet évènement est avant tout un moyen de diffuser la connaissance auprès du grand public dans les domaines de nouvelles technologies, écologie et développement durable européen. Il n'a aucun but lucratif hormis la médiatisation qui est associé. Chaque critère est couronné par un trophée. Les différents prototypes qui ont été présentés à Madrid, donnaient un avant goût de ce qui pourrait nous attendre d'ici quelques années, concernant les normes de construction en bâtiments solaires et la réglementation thermique associée.

21 universités ont été sélectionnées pour la compétition 2010 notamment : 7 universités espagnoles, 4 universités allemandes, 2 universités américaines,

2 universités chinoises, 1 université britannique, 1 université finlandaise, 1 université mexicaine, 1 université brésilienne et 2 établissements universitaires français.

La France a été représenté par La maison « Armadillo Box» présentée par l'Ecole Nationale Supérieure d'Architecture de Grenoble et la maison « Napévomo» présentée par le centre de Bordeaux-Talence d'Arts et Métiers ParisTech.

L'objet du paragraphe suivant est de présenter la maison Napévomo dans ses grandes lignes, le système développé dans cette thèse étant actuellement intégré dans celle-ci.

### *III.2 – Participation de l'Ecole Nationale d'Arts et Métiers (Arts et Métiers Paris Tech, campus Bordeaux-Talence) au SDE 2010 : la maison Napévomo*

Napévomo signifie en langue cheyenne "Est-ce que tu te sens bien? ", en référence au profond respect que le peuple amérindien voue à la Nature. C'est le nom donné à la maison modulaire 2D à énergie positive présenté par l'équipe d'Arts et Métiers ParisTech à Madrid en 2010.

L'équipe de projet Napévomo a rassemblé un consortium d'entreprises et d'établissements d'enseignement supérieur et de recherche, ceci pour le développement et la réalisation d'un prototype de cette maison solaire à énergie positive. Ce consortium a été coordonné par une équipe universitaire, composée d'élèves-ingénieurs encadrés par des enseignants-chercheurs. L'équipe du projet a géré les interactions entre tous les partenaires du consortium, a conçu l'ensemble du prototype et a réalisé en interne (au centre de Bordeaux-Talence d'Arts et métiers ParisTech) une partie de celui-ci.

En plus de répondre au mieux aux contraintes imposées par le Cahier des Charges de la compétition, Napévomo (Figure 30) affirme sa volonté de travailler dans le sens de l'économie locale et de minimiser les impacts environnementaux en terme de transport des matières premières et en termes de consommation d'énergie et d'eau. A cet effet, la maison Napévomo est réalisée en Pin Maritime (Pinus Pinaster), essence peuplant la plus grande forêt d'Europe cultivée, implantée en région Aquitaine (France). Ce choix de matériau naturel a aussi l'avantage d'être un matériau

renouvelable qui est, pour le moins, neutre d'un point de vue production de carbone sur son cycle de vie.

La structure ossature bois retenue comporte deux avantages : d'une part de permettre l'apposition d'une grande quantité d'isolant dans les parois (au regard de murs pleins) et d'autre part de faciliter le démontage-transport-remontage inhérent en particulier à la participation au SDE2010 à Madrid.



*Figure 30 : Maison Napévomo à Madrid en juin 2010 (vue du Sud Ouest)*

### III.2.1 – Présentation générale

La morphologie du prototype Napévomo a été développée en suivant les grands principes de l'architecture bioclimatique, afin de minimiser ses besoins en chauffage, rafraichissement et éclairage, tout en procurant un confort optimal à ses habitants.

A cet effet, Napévomo a une compacité satisfaisante puisque sa forme se rapproche du parallélépipède à base carré qui est la forme la plus compacte avec les contraintes considérées. De plus le bâtiment est allongé selon l'axe Est-Ouest permettant ainsi d'avoir une large paroi sud qui capte l'énergie du soleil en hiver, et

des parois Est et Ouest réduites afin de recevoir moins de chaleur en été. Cet allongement permet aussi d'améliorer l'éclairage naturel avec une superficie vitrée de 40% au sud, et peu de profondeur dans le sens Nord – Sud (Figure 31).

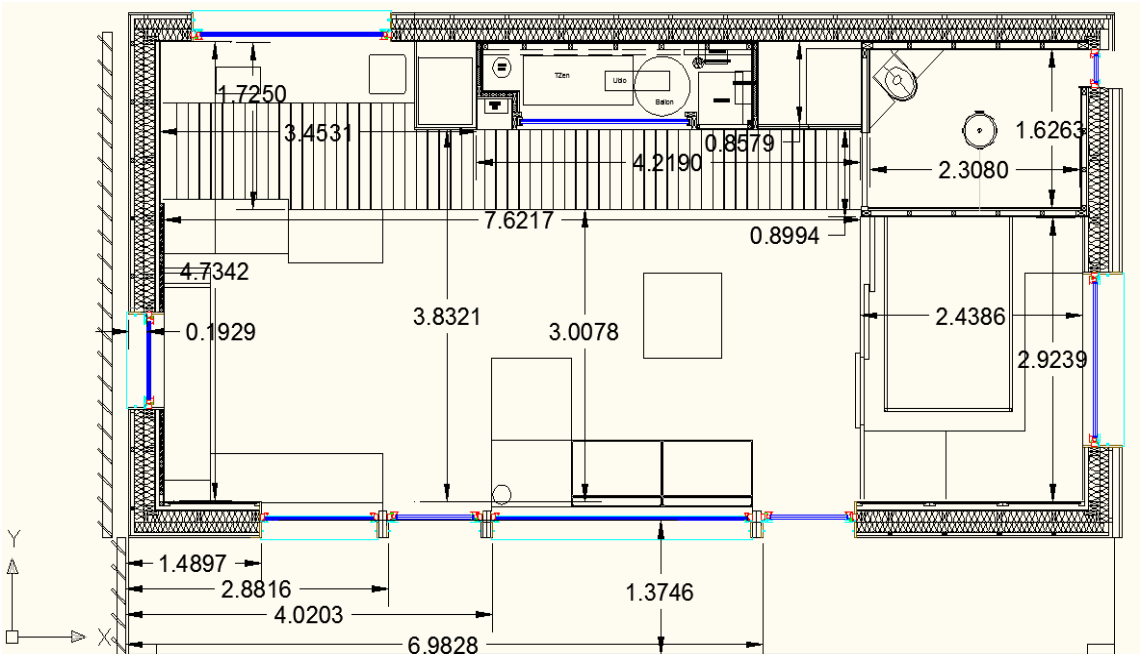



*Figure 31 : Plan de la maison Napévomo avec une surface habitable de 42 m$^2$ (le Sud est en bas du plan)*

L'organisation des espaces au sein de Napévomo est faite suivant le déplacement du soleil au cours de la journée. Le salon est ainsi largement ouvert au sud, les zones tampons: WC, salle de bain, local technique, cuisine, dont la plupart ne nécessitent pas un grand nombre d'ouvertures sur l'extérieur, sont quand à elles disposées au niveau de la façade nord. La chambre a été placée à l'Est pour profiter du soleil du matin en hiver et rester au frais pendant la nuit en été.

Napévomo est conçue pour une protection optimale du soleil afin de minimiser les apports solaires d'été par les fenêtres ou par les murs. Pour protéger les fenêtres du rayonnement solaire, Napévomo possède un auvent côté sud de 1,4 m permettant de protéger la façade d'environ 90% du rayonnement direct pendant tout l'été.

L'inconvénient principal des solutions à ossature bois est le manque de masse et ainsi d'inertie thermique. Afin de palier au manque d'inertie, plusieurs solutions ont été mise en oeuvre sur Napevomo :

* Choix d'isolants à forte inertie, notamment des panneaux de fibre de bois ;

* Ajout de masse à l'intérieur de l'enveloppe isolante notamment de la terre crue et de la terre cuite dans le plancher, des revetements extérieurs végétalisés (en toiture et sur le mur Est).

Les murs de Napévomo ont été conçus de telle sorte qu'ils soient perspirants : pour cela, les éléments constitutifs de la paroi ont un niveau de perméance croissant de l'intérieur vers l'extérieur. Un panneau contreventant est donc placé en intérieur et joue le rôle de frein tout en ayant une perméance non négligeable. L'élément placé le plus en extérieur est de la fibre de bois, avec un niveau de perméance très élevé.

### III.2.2 – Présentation des systèmes énergétiques présents dans la maison Napévomo

#### * Concentrateur cylindro parabolique

La production d'énergie est assurée d'une part par un système solaire de co-génération électricité-eau chaude sanitaire (ECS) innovant, et d'autre part par l'utilisation d'une surface de 16m$^2$ de cellules photovoltaïques classiques commercialisées par la société Sunpower (10 modules SPR-315-WHT ayant un rendement optimal annoncé de 19,3 %). Le système de cogénération est constitué d'un miroir cylindro-parabolique (Figure 32) qui concentre environ 50 fois le rayonnement solaire sur une ligne de cellules photovoltaïques fixée sur un support métallique massif; de façon à maintenir ces cellules dans un domaine de température compatible avec leur rendement optimum, une circulation d'eau contrôlée régule la température du support des cellules. Ce circuit de refroidissement assure une production d'eau chaude sanitaire qui est stockée dans un ballon ; le surplus éventuel d'eau chaude est évacué par un aérotherme. Ce système permet une utilisation restreinte en terme de surface de cellules photovoltaïque ; il amène ainsi à rendre performant économiquement l'utilisation de cellules à haut rendement.

Les productions électriques annuelles, dans la région de Bordeaux, de ces deux systèmes ont été respectivement estimées à 1200 kWh et 3300 kWh.



(a) (b)

*Figure 32 : (a) Vue facade Est de Napévomo : positionnement, respectivement au Nord et au Sud, des systèmes de production d'énergies respectivement par cogénération et utilisation de cellules photovoltaïques « classiques » (sur l'auvent situé au sud) (b) zoom sur le système de cogénération à concentration et du suivi solaire (d'après Bruneau et al., 2010).*

*** Le système HVAC**

Le système HVAC (Heat ventilation and Air-Conditionning) est le système de Chauffage-Ventilation-Rafraichissement qui assure une sécurité de fonctionnement de l'ensemble dans ces fonctions de chauffage et de refroidissement d'air : celui-ci est composé (i) d'un module de chauffage utilisant, au travers d'un échangeur eau-air, l'énergie de l'ECS solaire produite pour assurer, par ventilation d'air, l'essentiel du chauffage du bâtiment ; (ii) d'une micro pompe à chaleur récupérant les calories de l'air vicié pour chauffer l'air entrant ; cette micro-pompe permet à l'inverse, en cédant ses calories à l'air vicié, de rafraichir l'air entrant (system Tzen3000 commercialisé par la société Aldès) ; cette PAC permet, respectivement l'hiver et l'été, d'apporter un appoint en cas respectivement d'une insuffisance d'eau chaude sanitaire solaire ou d'une insuffisance du système de rafraîchissement à base de matériaux à changement de phase (cf. item suivant). Une ventilation double flux vient compléter le dispositif de façon à respecter la réglementation (Bruneau et al., 2010).

*** Système de rafraîchissement à base de matériaux à changement de phase**

Un rafraichissement d'air est mené par l'utilisation d'un système actif innovant; celui-ci est basé sur l'utilisation de Matériaux à Changement de Phase (MCP) au sein d'un échangeur Air-MCP. Il est partie intégrante du système HVAC.

Il fait l'objet de ce rapport de thèse dont les travaux ont pour but de présenter la conception, le dimensionnement, la réalisation de ce système de rafraîchissement, ainsi que les premiers essais réalisés sur celui-ci, en situation dans la maison Napévomo et en essais de laboratoire.

### *III.3 – Conclusion*

Dans ce paragraphe nous vous avons présenté le contexte dans lequel nos travaux se sont déroulés. A cet effet, nous avons présenté les grandes lignes de la maison Napévomo plus particulièrement les systèmes énergétiques de la maison. C'est dans cette maison que nous avons installé le système que nous avons conçu. Cette maison nous a permis de participer au concours Solar Décathlon Europe 2010 (SDE 2010) et de réaliser le système de rafraîchissement (et de stockage de surplus d'énergie solaire en hiver) à base de Matériaux à Changement de Phase à l'échelle 1.

Dans le chapitre suivant, nous vous présentons la recherche de concepts de l'échangeur Air-MCP que nous avons entrepris afin de définir un échangeur Air-MCP à la fois dimensionné pour le SDE 2010 et adaptable à toute situation de rafraîchissement et de stockage d'énergie d'un bâtiment en région Aquitaine.

## IV – Recherche de concepts d'un système de stockage d'énergie à MCP

### Introduction : Objectifs et méthodes

La recherche de concept ou « conceptual design », vise à explorer diverses solutions de principe pour aboutir à un choix du concept répondant aux besoins fonctionnels et spécifiques d'une problématique.

Pour mener à bien notre recherche de concept, nous faisons un couplage entre la démarche de conception classique et la conception architecturale. A cet effet, dans un premier temps nous définissons notre Cahier des Charges. Ensuite nous faisons une analyse fonctionnelle qui nous permet de déterminer les différentes fonctions du système. Par la suite, nous faisons une analyse architecturale qui nous permet de définir le Dossier de Concept Produit (DCP). Ce dernier définit les principales caractéristiques techniques du système. Ce dossier contient l'analyse du besoin du système, l'approche fonctionnelle et l'approche organique du système. Ce DCP nous permet de retenir les solutions technologiques du système.

### *IV.1 – Etablissement du Cahier des Charges*

Le Cahier des Charges de la maison Napévomo contient les besoins énergétiques de la maison Napévomo, l'ensemble des contraintes liées à l'intégration du système dans l'enveloppe de la maison (contrainte d'intégration) et à la participation de la maison au concours interuniversitaire Solar décathlon Europe 2010 (contraintes du concours).

#### IV.1.1 – Estimation des besoins énergétiques de la maison Napévomo

Nous avons réalisé des simulations thermiques dynamiques pour estimer les besoins énergétiques de la maison. Elles permettent aussi de vérifier et de montrer que la maison Napévomo a atteint un niveau de performance énergétique basse consommation (labellisable BBC Effinergie) tout en offrant aux occupants un confort thermique optimal durant toute l'année. Ces simulations thermiques dynamiques ont été réalisées sous un environnement Pleiade+Comfie.

Ce logiciel de simulation dynamique de la thermique des bâtiments est un moteur de calcul développé par IZUBA ENERGIES et le Centre Energétique et Procédés de Mines de Paris ParisTech (Salomon et al., 2005).

Ce logiciel intègre une bibliothèque de données thermiques sur les matériaux et les éléments constructifs, une bibliothèque de menuiseries, de scénarios d'albédos, d'écrans végétaux et d'états de surface. Pleiade+Comfie permet d'obtenir l'évolution des températures dans les différentes zones thermiques, les besoins en chauffage et les puissances de chauffage appelées pour couvrir ces besoins pour chaque zone (par heure ou demi-heure pour toute période choisie). Il intègre aussi l'évaluation du confort thermique, d'hiver et d'été, selon la définition des zones de confort Brager (zone de confort hygrothermique qui dépend à la fois de la température de zone intérieure considérée et de la température extérieure au bâtiment).

Pour réaliser ces différentes simulations, dans un premier temps on pose les objectifs de confort chiffrés que l'on doit atteindre et on définit les matériaux des parois ainsi que les ouvertures afin de calculer les ponts thermiques. Ensuite on détermine les différents scénarios de fonctionnement de la maison afin d'estimer les puissances instantanées et les besoins énergétiques sur des périodes choisies (semaine, mois, année) pour chaque scénario, ceci pour des conditions climatiques fixées correspondant à la zone géographique concernée.

### IV.1.1.1 – Présentation des objectifs de consommations visés

Les estimations des objectifs à atteindre (Tableau 9) ont été réalisées à partir conjointement : des consignes imposées par les données du label PASSIV HAUS et du label BBC-Effinergie. Ce dernier est une appellation visant à identifier les bâtiments neufs dont les très faibles besoins énergétiques contribuent à atteindre les objectifs de 2050 : réduire les émissions de gaz à effet de serre par 4.

| Indicateurs | Valeur Cible | Méthode de calcul |
|---|---|---|
| Critères « Energie » | Puissance de chauffage/climatisation ≤ 2400W<br>Besoins de chauffage ≤15 kWh/m²/an<br>Besoins en climatisation ≤ 30 kWh/m²/an | Simul. Th. Dyn (phase 1) |
| Critère « Confort Thermique » | Tmax = 28°C | Calcul RT 2005 (phase 4) |
| | Taux d'inconfort BRAGER ≤ 8 % | Simul. Th. Dyn et outil Ecocampus (phase 1) |
| Critère « balance énergétique » | Balance énergétique annuelle > 0 kWh | Calcul RT 2005 et outils Napévomo (phase 3) |

*Tableau 9 : Principaux objectifs à atteindre en fin d'étude de conception de la maison Napévomo (d'après Armand, 2010)*

### IV.1.1.2 – Présentation de l'enveloppe et estimation des ponts thermiques de la maison Napévomo

Un pont thermique est une zone ponctuelle ou linéaire qui, dans l'enveloppe d'un bâtiment, présente un défaut ou une diminution de résistance thermique. Il est à noter que l'influence des ponts thermiques dans un bâtiment tel que celui-ci n'est pas négligeable. Leur calcul précis est donc nécessaire et indispensable. Aujourd'hui de tels calculs ne sont pas très bien maîtrisés et nécessitent des études approfondies.

Les compositions des parois retenus sont présentées sur les Figure 33, Figure 34 et Figure 35 ci-dessous. Elles ont été choisies de façon à respecter un compromis isolation-déphasage-inertie-épaisseur acceptable. On peut noter la présence de terre crue (masse thermique), de panneau fibres de bois dense (structure secondaire), et de fibre de bois expansée (isolant). Les caractéristiques des menuiseries et de leur vitrage sont précisées dans ces figures ci-dessous.

Ces parois permettent individuellement d'atteindre les valeurs suivantes, calculées suivant les règles d'application Th-Bât de la RT 2005, de la transmission thermique U, de la capacité de stockage thermique Cp et du déphasage thermique φ :

- Murs ouest avec terre crue : U = 0,18 W/($m^2$.K), Cp = n31 W/($m^2$.K), φ =14,8 h
- Plancher [1]: U = 0,15 W/($m^2$.K), Cp = 32.5. Wh/($m^2$.K), φ =13.4 h.
- Plafond : U = 0,148W/($m^2$.K), Cp = 7 Wh/($m^2$.K), φ = 1,2,3 h.

| N° | Désignation Matériau | Epaisseur [mm] | ρ [kg/m3] | λ [W/(m.K)] | Cp [J/ (kg.K)] | μ |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | **Bardage Pin Maritime** | 22 | 500 | 0,14 | 1500 | 35 |
| 2 | **Lame d'air fortement ventilée** | 40 | _ | _ | _ | 1 |
| 3 | **panneau Fibre de Bois** | 100 | 170 | 0,042 | 2100 | 5 |
| 4 | **Isolant fibre de bois** | 120 | 55 | 0,038 | 2100 | 5 |
| 5 | **Ossature pin maritime 45 /120 [entre axe 600 mm]** | 120 | 500 | 0,14 | 1500 | 35 |
| **6** | **Panneau fibre bois** | 8 | 800 | 0,1 | 2100 | 60 |
| **7** | **Lame d'air non ventilée (Vide Technique)** | 40 | _ | 0,155 | _ | 1 |
| **8** | **Panneau Gypse-cellulose** | 12,5 | 1125 | 0,36 | 1100 | 13 |
| **9** | **Panneau de Terre crue** | 40 | 1950 | 0,87 | 850 | 8 |
| **10** | **Panneau gypse-cellulose** | 12,5 | 1125 | 0,36 | 1100 | 13 |

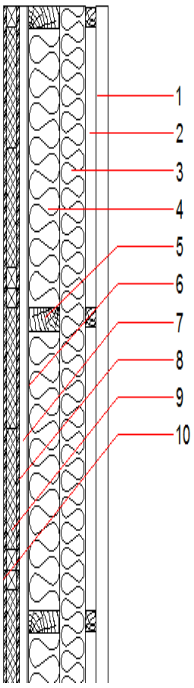
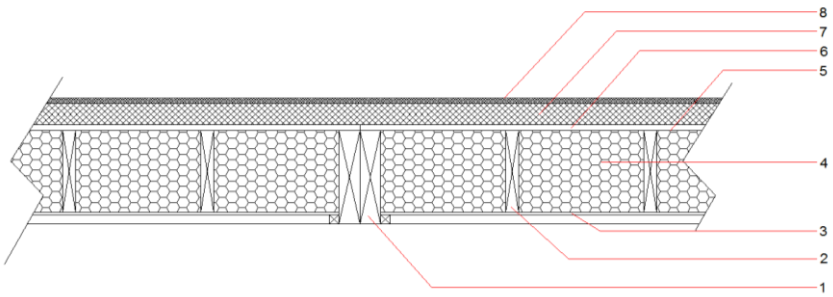


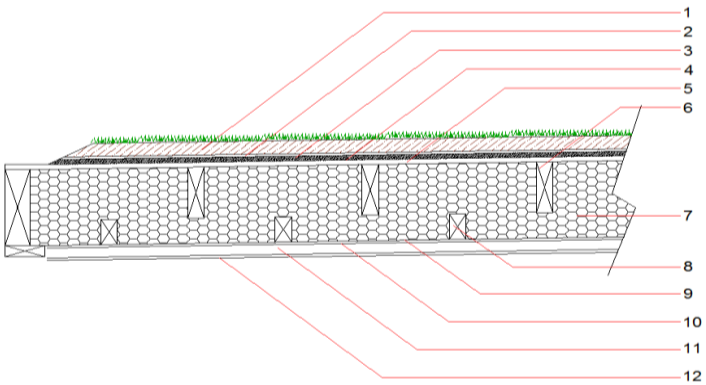

*Figure 33 : Composition des murs de Napévomo (d'après Bruneau et al., 2010)*

[1] Les valeurs données ici sont moyennées sachant que seul le plancher de l'espace de vie principal (50% de la surface de la maison) contient de la terre crue.




| N° | Désignation Matériau | Epaisseur [mm] | ρ [kg/m3] | λ [W/(m.K)] | Cp [J/(kg.K)] | μ |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | Ossature bois 360x75 | 360 | 500 | 0,14 | 1500 | 35 |
| 2 | Ossature bois 315x48 | 315 | 500 | 0,14 | 1500 | 35 |
| 3 | Contreplaque | 10 | 580 | 0,13 | 1500 | 75 |
| 4 | Ouate de cellulose | 315 | 32 | 0,041 | 2000 | 2 |
| 5 | Pare Vapeur | | 160g/m² | | | Sd= 110 m |
| 6 | Contreplaque | 22 | 580 | 0,13 | 150 | 75 |
| 7 | Terre crue | 80 | 1950 | 0,87 | 850 | 8 |
| 8 | Terre cuite | 20 | 1900 | 1,15 | 900 | 10 |

*Figure 34: Composition du plancher de Napévomo (d'après Bruneau et al., 2010)*




| N° | Désignation Matériau | Epaisseur [mm] | ρ [kg/m3] | λ [W/(m.K)] | Cp [J/(kg.K)] | μ |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | Tapis végétale | 50 | 1700 | 1,26 | 600 | |
| 2 | Protection anti-racine | | | | | |
| 3 | Couche drainante | | | | | |
| 4 | Couche d'étanchéité | 1 | | | | |
| 5 | Contreplaque | 22 | 580 | 0,13 | 1500 | 75 |
| 6 | Poutre bois 200X50 | 200 | 500 | 0,14 | 2400 | 35 |
| 7 | Ouate de cellulose | 300 | 32 | 0,041 | 2000 | 2 |
| 8 | Poutre bois 100X50 | 100 | 500 | 0,14 | 2400 | 35 |
| 9 | Pare Vapeur | | 160g/m² | | | Sd= 110 m |
| 10 | Contreplaque | 10 | 580 | 0,13 | 1500 | 75 |
| 11 | Lames d'air ventilées | 25 | | | | |
| 12 | Panneau Gypse-cellulose | 12,5 | 1125 | 0,32 | 1623 | 13 |

*Figure 35 : Composition du plafond de Napévomo (d'après Bruneau et al., 2010)*

Les surfaces vitrées de la maison Napévomo sont situées sur la façade sud (pièce à vivre), à l'est (chambre et salle de bain), à l'ouest (espace bureau) et au nord (espace cuisine). Une fenêtre zénithale protégée par une casquette solaire participe aussi à une aération nocturne efficace. Leurs caractéristiques sont données dans le Tableau 10.

| N° | Type | Orientation | Emplacement | Largeur (mm) | Hauteur (mm) | % Vitré | Vitrage | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | | | U (W/m2K) | FS (%) |
| 1 | **Fenêtre Fixe** | Sud | Séjour | 1300 | 1700 | 77 | 0,7 | 50 |
| 2 | **Porte Fenêtre Battante** | Sud | Séjour | 1050 | 2100 | 67 | 0,7 | 50 |
| 3 | **Fenêtre Fixe** | Sud | Séjour | 2870 | 1700 | 85 | 0,7 | 50 |
| 4 | **Porte Fenêtre Battante** | Sud | Séjour | 1050 | 2100 | 56 | 0,7 | 50 |
| 5 | **Fenêtre oscillo-battante** | Est | Chambre | 1800 | 800 | 55 | 0,6 | 42 |
| 6 | **Fenêtre Fixe** | Est | Salle de Bain | 400 | 2200 | 46 | 0,6 | 42 |
| 7 | **Fenêtreoscillo-battante** | Nord | Cuisine | 2200 | 700 | 56 | 0,6 | 42 |
| 8 | **Fenêtre oscillo-batante** | Ouest | Séjour | 1000 | 1000 | 55 | 0,6 | 42 |
| 9 | **Fenêtre zénithale** | Sud | Toiture (X2) | 1425 | 500 | 63 | 0,6 | 42 |

*Tableau 10 : Caractéristiques des surfaces vitrées de Napévomo (d'après Bruneau et al, 2010)*

Des triples vitrages ont été choisis. Leurs caractéristiques relèvent d'un compromis entre isolation thermique (caractérisé par le facteur de transmission thermique U) et le facteur de transmission du rayonnement solaire FS amenant à optimiser les apports thermiques d'hiver et de minimiser les besoins de rafraichissement estivaux, ceci à la fois sous un climat Aquitain et un climat Madrilène.

A partir de ses différentes caractéristiques des matériaux des parois de la maison Napévomo, les ponts thermiques suivants ont été calculés à l'aide de simulations réalisées sous consol (Tableau 11):

| **Ponts thermiques linéiques** | **ψ (W/m.K)** |
|---|---|
| Liaison plancher/mur extérieur | 0.08 |
| Liaison angle mur extérieur/mur extérieur | 0.062 |
| Liaison mur/toiture | 0.05 |
| Appui, tableau, liteau d'ouvrants | 0.1 |
| Ossature plancher | 0.02 |
| Ossature mur | 0.014 |
| Ossature toiture | 0.02 |
| **Ponts thermiques ponctuels** | **X (W/K)** |
| Liaisons pilotis | 0.03 |

*Tableau 11 : Ponts thermiques de la maison Napévomo (d'après Armand, 2010)*

### IV.1.1.3 – Présentation des scénarios de vie retenus

Les scénarios d'occupation ont été élaborés pour un couple de 2 personnes dans les conditions d'utilisation de la maison comme indiqués dans le Tableau 12.

| **Bedroom** | | **Living Room** | **Kitchen** | **Bathroom** |
|---|---|---|---|---|
| **Semaine** | 22h-23h : 25%<br>23h-7h : 100% | 7h-8h : 50%<br>8h-9h : 25%<br>18h-19h : 50%<br>19h-20h :100%<br>20h-21h : 50%<br>21h-22h : 100%<br>22h-23h : 50% | 7h-8h : 25%<br>20h-21h : 50% | 7h-8h : 25%<br>22h-23h : 25% |
| **Week-end** | 23h-00H : 25%<br>00h-9h : 100% | 9h-13h :50%<br>13h-14h : 100%<br>14h-19h : 50%<br>19h-20h :100%<br>20h-21h : 50%<br>21h-23h : 100%<br>23h-00h : 50% | 9h-10h : 25%<br>12h-13h : 50%<br>20h-21h : 50% | 9h-10h : 25%<br>23h-00h : 25% |

*Tableau 12 : Estimation du temps d'occupation de la maison (d'après Armand, 2010)*

**a) Scénario de consigne de chauffage**

La consigne de température dépend de l'occupation. Lorsqu'il n'y a personne, le bâtiment est maintenu à un minimum de 16 °C. Lorsqu'il y a occupation la température passe progressivement à 19 °C dans les zones occupées. Cela permet alors d'avoir des puissances moins élevées. Dans la salle de bain la température est de 21 °C lorsqu'elle est occupée. Durant la nuit, la température de la chambre est maintenue à une température de 18 °C.

**b) Scénario de consigne de refroidissement**

La compétition se passait au mois de Juin et les mesures de températures sur la maison effectuées par le concours SDE 2010 ont eu lieu en continu du samedi 19 Juin au vendredi 25 Juin.

D’après le fichier météo de Madrid moyenné sur 10 ans, la semaine la plus chaude tombe justement cette même semaine et les températures diurnes extérieures varient de 24 °C à 34 °C.

Or comme on peut le constater sur la Figure 36, la zone de Brager permet d’atteindre jusqu’à 31 °C avec de telles températures extérieures tout en gardant un confort thermique acceptable. Même à 24 °C la température intérieure peut atteindre 28 °C sans altérer celui-ci. Au vue de cette contrainte fixée par le Solar Décathlon. Ces contraintes de Brager sont de notre avis pas assez contraignants pour définir des besoins de rafraîchissement amenant à une performance énergétique élevée. Ainsi nous avons choisi une consigne de température n’excédant pas 28 °C sur la période d’été, ceci de façon à imposer pour le dimensionnement de Napévomo des critères de bâtiment compatibles avec les labels PassivHaus et BBC effinergie présentés dans le tableau 8 (§ IV.1.1.1)

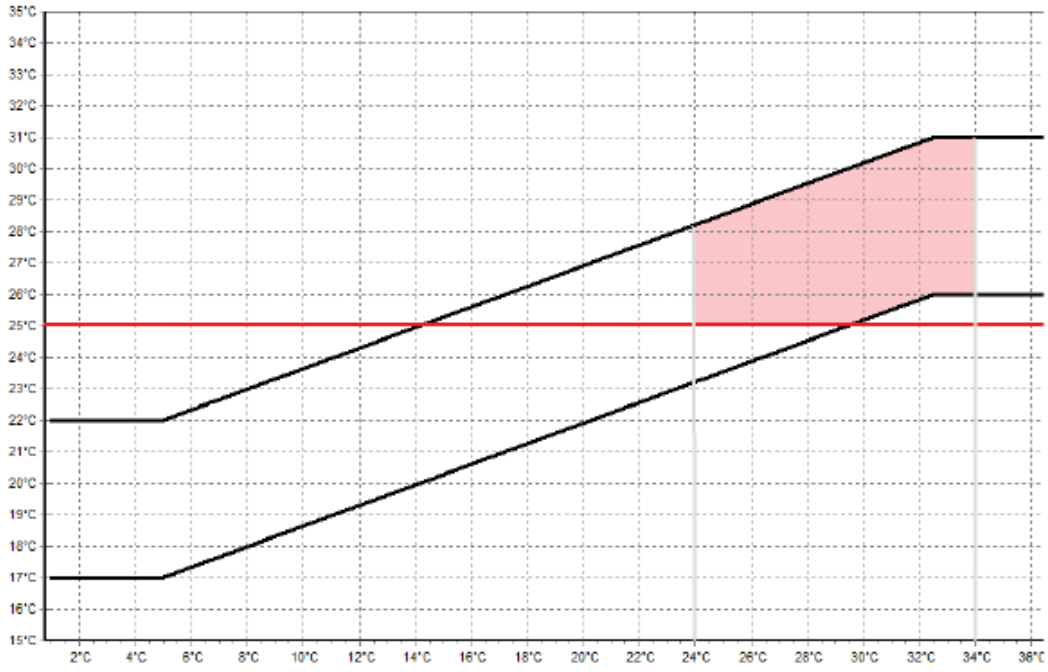



*Figure 36 : Etude de la zone de Brager durant la période de compétition Solar décathlon 2011 (d’après Armand, 2010)*

### c) Scenario de puissance dissipé

Il n’est pas évident d’estimer les puissances dissipées dans un bâtiment. D’autant que dans un tel bâtiment les appareils électroménagers et les luminaires utilisés ont des

consommations plus faibles que traditionnellement. La réglementation thermique qui implique une certaine puissance dissipée en W/m² n'est alors pas valable. Quelques recherches et quelques estimations (par exemple, la puissance dissipée d'une LED est égale à la moitié de sa puissance consommée) ont été effectuées :

*** besoins énergétiques de la maison**

- Cuisine :

Hiver : Petit déjeuner : 80 W, Déjeuner : 200 W, Diner : 200 W

Eté : Petit déjeuner : 50 W ; Déjeuner : 150 W, Diner 150 W

Frigidaire/congélateur : Consommation annuelle moyenne de 20 W/h/an

Lave Vaisselle : Moyenne de 252 W de puissance sur un cycle de 2,5 h. On estime la puissance dissipée à : 100 W sur 2,5 h (Eau chaude + Séchage)

Lumière : 10 W

- Salon/séjour

Période d'occupation : Télévision/Hi-Fi/Ordinateur/Luminaires/… : 35 W de puissance dissipée en été et 40 W en hiver.

Lave linge : Moyenne de 502 W de puissance sur 2 h. On estime la puissance dissipée à : 50 W sur 2 h (Essentiellement eau chaude et essorage)

- Chambre :

Lumière : Puissance de lampe de 30 + 2 x 3 = 36 W. Puissance dissipée max (si tout est allumé) de 18 W, soit 15 W retenu pour pléiade+comfie lors de l'occupation.

- Salle de bain :

Lumière/Sèche cheveux… Moyenne de 10 W de puissance dissipée lors de l'occupation.

- Salle technique :

Ballon d'eau chaude de 300 L soit une puissance dissipée de 90 W permanente. Car on estime une perte de 2 °C durant la nuit, soit sur 8 h, en partant de 55 °C.

**d) Scénario d'occultation**

Durant la nuit, été comme hiver les fenêtres sont occultées. Pour des raisons techniques il n'y en a pas sur la fenêtre zénithale ni dans la salle de bain. L'hiver les fenêtres ne sont occultées que durant les périodes nocturnes. L'été les fenêtres Est, Ouest (chambre) et Sud sont occultées à 50 % durant la journée. En mi saison, les fenêtres orientées sud sont occultées à 30 % de 10 h à 15 h afin de limiter les surchauffes.

**e) Scénario de ventilation**

Les débits de sur-ventilation maximum sont fixés à 270 $m^3$/h pour l'ensemble séjour/cuisine et à 90 $m^3$/h pour l'ensemble chambre/salle de bain. Un rendement de 60% pour la ventilation double flux a été utilisé.

### IV.1.1.4 – Calculs des besoins thermiques

La Figure 37 représente la simulation de la température dans la maison Napévomo à Madrid (courbe en grise) et à Bordeaux (courbe en rouge) sans consigne température. On constate que pour le climat de Bordeaux les protections solaires mises en place suffisent à garder une température inférieure à 28°C.

Les besoins de chauffage ont été déterminés sur une période d' « hiver » allant du 22 octobre au 7 Mai (Figure 37), pendant cette période aucun système de refroidissement n'était considéré (utilisé).
De même le confort d'été et les besoins de refroidissement ont été déterminés sur une période d'été allant du 21 Mai au 17 Septembre (Figure 37), pendant cette période aucun système de chauffage n'est considéré (utilisé).

Il est à noter que de nombreuses périodes de surchauffe surviennent durant la saison hivernale (Figure 37). Ceci est certainement dû à une surface vitrée orientée Sud trop importante et à un manque d'inertie.

Cependant ces surchauffes sont ponctuelles et dépassent rarement les 28 °C.

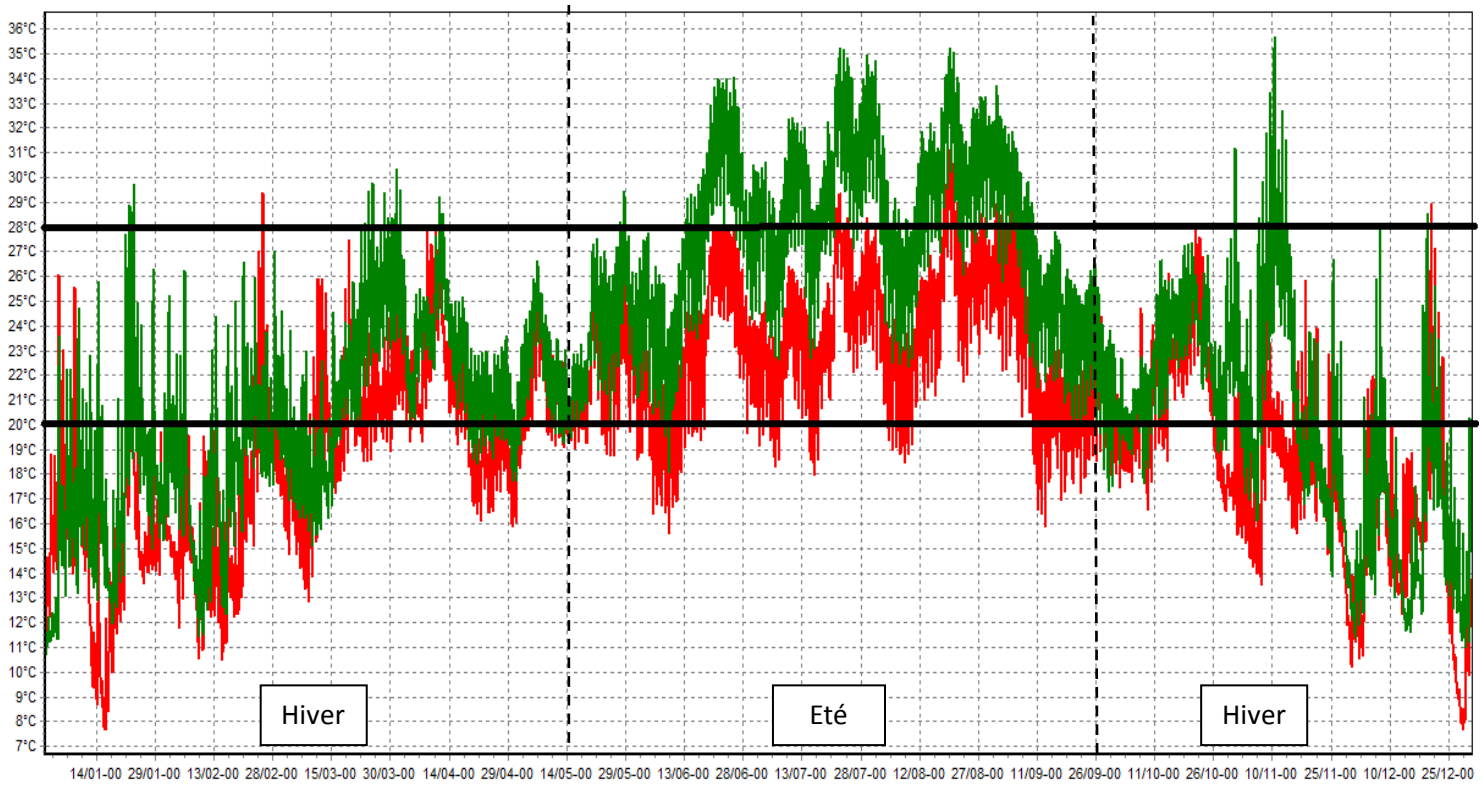



*Figure 37 : températures de la maison Napévomo à Madrid (couleur verte) et à bordeaux (couleur rouge) sans consigne de température (d'après Armand, 2010).*

Les valeurs obtenues par le logiciel Pleiade+comfie (cf. Tableau 13) sont inférieures aux valeurs visées (voir le § IV.1.1.1, comme l'indique le tableau 8). Les objectifs visés sont respectés : La maison Napévomo est bien une maison a un niveau de performance énergétique basse consommation (labellisable BBC Effinergie et passiv Haus).

| Bilan Energétique | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Désignation du modèle | HIVER | | | ETE T< 28°C | | |
| Napévomo (projet optimisé) | Besoins chauffage | Puissance chauffage Max | Apports solaires directs | Besoins climatisation | Puissance de climatisation | Apports solaires directs |
| | 11 KWh/m$^2$.an | 1871 W | 2070 (KWh) | 29 KWh/m$^2$.an | 2273 W | 601KWh |

*Tableau 13 : Bilan des besoins énergétiques de la maison Napévomo (Armand, 2010)*

### IV.1.2 – Description des contraintes liées à l'intégration du système dans la maison Napévomo

* Les contraintes en termes d'encombrement de l'échangeur-stockeur, imposées par le consortium Arts et Métiers ParisTech - partenaires industriels à l'origine de la réalisation de Napévomo, amenaient à définir un système dont les modules (au nombre de 4 au maximum) ne dépassaient pas les dimensions suivantes : section transversale 300 mm x 400 mm et de longueur 4400 mm au maximum ; nous avons fixé une longueur maximal de 3500 mm pour chaque module, de façon à laisser au minimum 900 mm pour pourvoir rajouter les éléments de connexion (conduites, gaines, collecteurs, vannes, etc.) tout en assurant une longueur totale du système de refroidissement comprise entre 4000 mm et 4500 mm au maximum.

* Un choix de 2 °C a été retenu quant à la baisse de température de l'air entre l'entrée et la sortie de l'échangeur : en effet, l'air refroidi étant, pour des raisons de facilitation de l'homogénéisation de la température, réinjecté à 2 m de hauteur dans la maison, un trop grand différentiel de température entre l'air ponctionné dans le bâtiment et celui réinjecté dans celui-ci nuirait au confort thermique des occupants. D'autre part, pour ces mêmes raisons de confort, nous avons choisi de limiter le taux de renouvellement d'air à 7 volumes par heure pour le prototype de maison envisagé ;

## *IV.2 – L'analyse fonctionnelle du système*

L'analyse fonctionnelle du système permet de recenser de façon exhaustive, d'ordonner, et de hiérarchiser les différentes fonctions (fonction principale, les situations de vie, les fonctions secondaires et les fonctions contraintes) du système. Ce recensement contribue au dimensionnement des différents éléments du système.

### IV.2.1 – La fonction principale

Plusieurs méthodes existent pour déterminer la fonction principale. Nous utilisons la méthode « la bête à cornes ». Elle nous permet de déterminer la fonction principale, en se posant les questions suivantes sur le système envisagé (Figure 38) :

- A qui rend t-il service ?
- Sur qui agit-il ?
- Dans quel but est-il réalisé ? (pour quoi faire?)

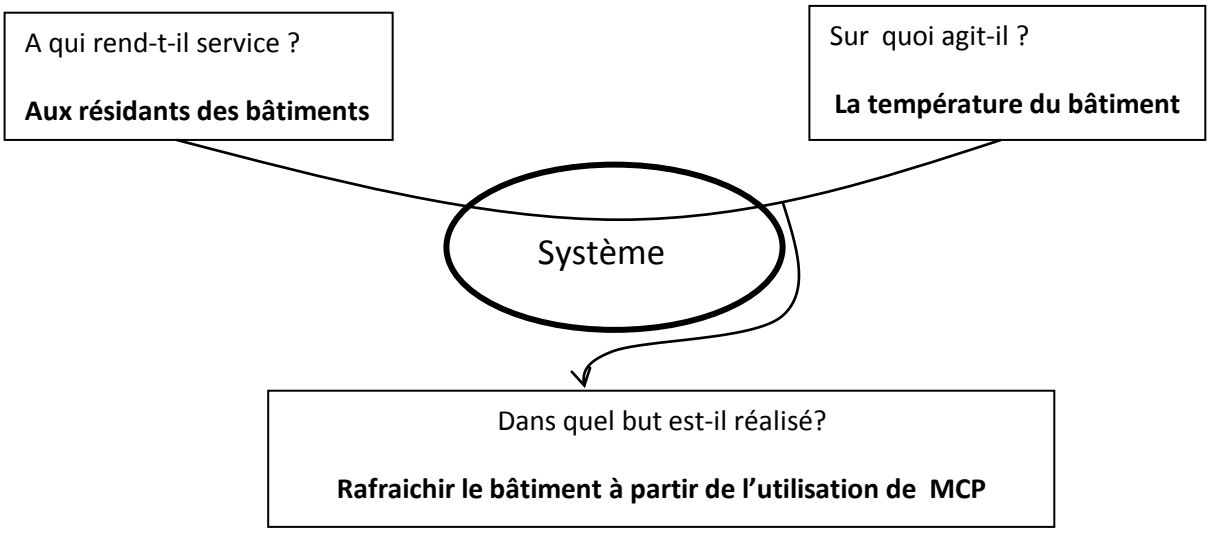



*Figure 38 : Diagramme pieuvre ou bête à cornes du système*

La fonction principale du système est pour nous : *Améliorer le confort d'été de la maison Napévomo*

### IV.2.2 – Les fonctions secondaires et leurs fonctions contraintes

Les fonctions secondaires ou complémentaires (FS1) sont les fonctions qui améliorent le fonctionnement du système. Les fonctions de contraintes (FC1) permettent de limiter les libertés de choix au concepteur-réalisateur.

Le Tableau 14 représente les principales fonctions secondaires et leurs fonctions contraintes du système.

| Fonctions secondaires ou complémentaires (FS1) | Fonctions Contraintes (FC1) |
|---|---|
| - S'adapter au changement de températures de l'environnement ;<br>- Consommer le moins d'énergie possible pour fonctionner (système le plus passif possible) ;<br>- S'intègrer facilement la maison Napévomo. | - Installation du système complet ;<br>- Disposition de l'échangeur ;<br>- Disposition du circuit aéraulique ;<br>- Conductivité des MCP. |

*Tableau 14 : Fonctions secondaires et fonctions contraintes de l'analyse fonctionnelle du système*

### *IV. 3 - Analyse architecturale du système*

L'analyse architecturale nous permet de définir le Dossier de Concept Produit (DCP) dans lequel il y a : (i) les choix structuraux, (ii) les choix des composants et (iii) les principales dimensions du système. Dans le cadre de nos travaux de thèse, cette analyse se subdivise en trois sous étapes : l'analyse et la structuration du besoin, l'approche fonctionnelle, l'approche organique.

#### IV.3.1 – L'analyse et la structuration du besoin

L'analyse et la structuration du besoin permettent à l'utilisateur d'exprimer au concepteur, pour les différents situations de vie envisagées, le besoin en termes technologique, technique, économique et marketing, ainsi qu'en terme de délais.

L'analyse et la structuration du besoin se subdivise en deux étapes : (i) l'analyse du besoin et (ii) l'énoncé des critères de qualification.

#### IV.3.1.1 – Analyse du besoin

L'expression fonctionnelle du besoin est : Concevoir et fabriquer un système de stockage/déstockage de chaleur fonctionnant avec les Matériaux à Changement de Phase (MCP) et permettant un rafraichissement par stockage de chaleur d'une maison de type Napévomo en situation estivale à Madrid.

### IV.3.1.2 – Critères de qualification

Les critères de qualification nous permettent d'homologuer la conception du système. Nous n'avons retenu que trois critères :

- Les critères technologiques ;
- Les critères économiques ;
- Les critères techniques.

Ces critères sont exprimés en fonction de leur importance (K) et de leur négociabilité (F). K et F sont définis comme suit :

- K : 1.utile – 2. nécessaire – 3. important – 4.très important – 5. vital,
- F : 0. impératif – 1.peu négociable – 2.négociable – 3.très négociable.

### IV.3.1.2.1 – Les critères technologiques

Les critères technologiques concernent la vérification de la réalisation des fonctions du système et les attributs de ce dernier relatif à sa structure. Le Tableau 15 récapitule ces différents critères et les choix d'importance et de négociabilité effectués.

| Critères | Caractérisation | | K | Niveau | Flexibilité | F |
|---|---|---|---|---|---|---|
| ***Critères fonctionnels*** | | | | | | |
| Performance attendue | Rafraîchir la maison en fonction des besoins des occupants | | 5 | 8 h/jour | ± 2 h | 0 |
| Durée de vie minimale | MTTF : mean time to (first) failure | | 3 | MTTF > 10 ans | ± 6 mois | 1 |
| Fiabilité | MTBF : mean time between failure | | 3 | MTBF > 1 an | ± 6 mois | 2 |
| Disponibilité | Disponibilité = Dop = MTBF / (MTBF+MTTR) | | 3 | 0,9 an < Dop < 1 an | ± 0,05 | 3 |
| Maintenabilité | MTTR : mean time to repair | | 3 | MTTR < 24 h | ± 1 h | 3 |
| | Contraintes technologiques | Facilité de démontage/montage : forme | 3 | à tester | - | 2 |
| | | Réparabilité : ergonomie | 2 | à tester | - | 2 |
| | | Outillage : forme | 3 | à tester | - | 2 |
| | | Accessibilité : forme, accès | 2 | à tester | - | 2 |
| | | Facilité d'entretien : forme accès | 2 | à tester | - | 2 |
| Sécurité | Fuite des MCP | | 5 | à tester | - | 1 |
| | Contact air /MCP | | 5 | à tester | - | 1 |
| | Disposition des coffrets dans la maison | | 4 | à tester | - | 2 |
| | Durée de vie du système | | 2 | 10 ans | ± 2 ans | 3 |
| Autonomie | Mise en route | | 2 | Durée < 20 mn | ± 10 mn | 2 |
| | Durée de fusion des MCP | | 3 | Durée > 8 h | ± 1 h | 1 |
| | Durée de solidification des MCP | | 3 | Durée < 10 h | ± 1 h | 1 |
| ***Critères structurels*** | | | | | | |
| Masse | Masse des éléments transportables | | 2 | Masse< 1 tonne | ± 100 kg | 3 |
| Encombrement | Dimensions maximales des caissons longueur (L), largeur (l), hauteur (h) | | 4 | L < 3412 mm<br>l < 300 mm<br>h < 200 mm | ± 2 mm<br>± 2 mm<br>± 2 mm | 2 |
| Complexité | Nombre d'éléments métalliques (NEME) à assembler dans le système | | 2 | NEM < 300 | ± 5 | 3 |
| | Nombre d'éléments à coller ou souder | | 2 | 100 | ± 10 | 2 |

*Tableau 15 : Critères technologiques du système.*

### IV.3.1.2.2 – Les critères économiques

Ils permettent d'estimer les coûts utilisés aux différentes phases du cycle de vie du système. Nous utilisons l'approche du développement durable qui consiste à satisfaire les besoins des générations présentes, sans réduire la possibilité des générations futures de satisfaire les leurs. Il existe plusieurs indicateurs clés de l'approche économiques (Scaravetti**,** 2004). Par rapport à nos travaux de thèse, ses critères et les choix d'importance et de négociabilité effectués sont résumés dans le Tableau 16.

| Critères | Caractérisation | K | Niveau | Flexibilité | F |
|---|---|---|---|---|---|
| N.B : durée d'amortissement = 10 ans | | | | | |
| Coût de production | Fonctionnement lié a l'électricité | 2 | Coût<2000 € | ±20 € | 2 |
| | Main d'œuvre | | | | |
| | - Gestion du produit | 2 | Coût<4000 € | ±20 € | 2 |
| | - Gestion du système | 2 | Coût<3500 € | ±100 € | 2 |
| | - Acquisition | 2 | Coût<2500 € | ±100 € | 2 |
| | - Production | 2 | Coût<8000 € | ±50 € | 2 |
| Coût de possession | 5 % du coût de production | 2 | Coût<1000 € | ±100 € | 1 |
| Coût de maintenance | 7,5 % du coût de production | 2 | Coût<1500 € | ±100 € | 2 |
| Coût de recyclage | 15 % du coût de production | 2 | Coût<3000 € | ±20 € | 3 |

*Tableau 16 : Critères économiques du système*

### IV.3.1.2.3 – Les critères techniques

Ce sont les critères relatifs à des contraintes globales du Cahier des Charges. Ces critères sont résumés dans le Tableau 17 de même que le choix d'importance ainsi que de négociabilité que j'ai effectué.

| Critères | | Caractérisation | K | Niveau | Flexibilité | F |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Délais de développement | | Temps de mise en disponibilité | 5 | 7 jours | ± 2 jours | 3 |
| Risques | Conception | 15 % du coût de production | 3 | Coût<3000 € | ±50 € | 3 |
| | Achats | 5 % du coût de production | 3 | Coût<1000 € | ±50 € | 3 |
| | Fabrication | 30 % du coût de production | 3 | Coût<6000 € | ±50 € | 3 |
| Mise en route | | Temps de mise en route | 3 | ±2heures | ±30mn | 3 |
| Impact environnemental | | Nuisances causés par le système | 2 | / | / | 2 |
| Perception utilisateur | | Appréciation des résidants | 2 | / | / | 0 |

*Tableau 17 : Critères techniques du système*

### IV.3.2 – Approche fonctionnelle du système

L'approche fonctionnelle vise à définir les fonctionnalités du système que nous concevons. A cet effet, elle va nous permettre de définir le besoin à satisfaire à partir des différentes situations de vie du système. Pour chaque situation de vie du système, nous déterminons les différentes fonctionnalités, notamment les fonctions de services (c'est-à-dire les actions attendues du système pour répondre au besoin pour une utilisation donnée) et les fonctions de contraintes (c'est-à-dire les contraintes auxquels le concepteur doit faire face pour atteindre ses objectifs).

Il existe plusieurs méthodes pour les déterminer, nous choisissons une méthode utilisant le « diagramme pieuvre ». Cette méthode nous permet de déterminer la fonction principale. Elle va permettre aussi à la fois d'accroître la qualité (c'est-à-dire aboutir à une meilleure adéquation aux besoins de l'utilisateur) et de diminuer le coût de ce que l'on étudie.

Nous retenons les situations de vie les plus importantes, celles qui engagent (i) l'élaboration du système et (ii) les moyens techniques liés au transport ou à la fabrication de celui-ci.

Comme vous pouvez le voir dans le Tableau 18, nous avons retenu neuf situations de vie pour notre système. Chacune d'elles renferme une fonction de service (FS2). Chaque fonction de service a un certain nombre de fonctions de contraintes (FC2). La première situation de vie est la plus importante car sa réussite à un impact très important pour les autres situations de vie.

| Situations de vie | Fonctions de service (FS2) | Fonctions contraintes (FC2) |
|---|---|---|
| 1. Conception et fabrication | Utiliser les matériaux que les techniciens savent manier selon leurs compétences. Tenir compte de la dilatation des MCP lors du changement de phase. | FC211 : satisfaire aux conditions de coûts ;<br>FC212 : intégrer les matériaux qui améliorent les échanges thermiques ;<br>FC213 : satisfaire les normes thermiques françaises ;<br>FC214 : faciliter le travail des fabricants. |
| 2. Transport | Permettre le transport des différentes pièces du système. | FC221 : assurer une installation facile ;<br>FC222 : s'adapter à l'environnement ;<br>FC223 : faciliter le transport. |
| 3. Montage – Assemblage du système | Faciliter le montage des pièces.<br><br>Faciliter le remplissage des MCP dans les échangeurs.<br><br>Permettre la dilatation des MCP. | FC231 : faciliter le montage des différentes pièces.<br>FC232 : faciliter le travail du personnel technique ;<br><br>FC233 : faciliter la circulation de l'air entre les tubes contenant les MCP ;<br><br>FC234 : faciliter l'intégration du système dans la maison Napévomo. |
| 4. Fonctionnement le jour | Faciliter la fusion des MCP.<br><br>Rafraîchir l'air du bâtiment. | FC241 : fonctionner le jour ;<br>FC242 : durer de fonctionnement 8 h au minimum ;<br>FC243 : avoir une bonne étanchéité entre les MCP et l'air ;<br>FC244 : $\Delta T_{E-S} \leq 2°C$. |
| 5. Fonctionnement la nuit | Faciliter la solidification des MCP.<br><br>Faciliter la régénération des MCP. | FC251 : fonctionner la nuit ;<br>FC252 : assurer une durée de régénération < 10 h ;<br>FC253 : avoir une bonne étanchéité entre les MCP et l'air. |
| 6. Réglage | Permettre le réglage des débits d'air. | FC261 : faciliter le réglage des débits d'air. |
| 7. Agression émanant de l'environnement | Résister aux agressions extérieures | FC271 : protéger le système du milieu extérieur. |
| 8. Maintenance et Réparation | Permettre la maintenance et l'entretien du système. | FC281 : atteindre les différentes zones de l'échangeur et des circuits aérauliques;<br><br>FC282 : avoir des pièces échangeables. |
| 9. Démontage du système | faciliter le démontage des pièces | FC291 : avoir des pièces démontables. |

*Tableau 18 : Enoncé des situations de vie du système : associées fonctions de service et fonctions contraintes en approche fonctionnelle*

### IV.3.3 – Approche organique du système

L'approche organique nous permet d'assurer le passage des fonctions du système (service et contraintes) aux composants de celui-ci. A cet effet, nous utilisons le diagramme FAST. C'est un outil d'analyse et de recherche de concept qui permet, à partir d'une fonction principale à satisfaire, de réaliser une décomposition en fonctions techniques et de déboucher sur des solutions technologiques.

#### IV.3.3.1 – Le diagramme FAST du système

Après identification des fonctions qui ont été faite dans le paragraphe IV.3.1 (Tableau 18), le diagramme FAST va traduit sous forme de diagramme un enchaînement hiérarchisé de fonctions techniques (Figure 39). Ayant en mémoire la fonction principale "Améliorer le confort d'été de la maison Napévomo" et les fonctions secondaires (tableau 12), elle s'appuie sur une technique interrogative sur chacune des fonctions de service (tableau 17). Les questions posées sont :

- Pourquoi cette fonction est elle réalisée ?
- Comment cette fonction est elle réalisée ?
- Quand cette fonction est elle réalisée ?

Les solutions technologiques obtenues à partir du diagramme FAST sont (Figure 39) :

- L'échange thermique entre les MCP et l'air se fera par l'intermédiaire de tubes qui seront remplies par les MCP. Nous choisissons donc un système d'échangeur thermique entre de l'air et des tubes contenant les MCP. L'échange thermique sera amélioré par l'apposition de déflecteurs qui seront installés sur les tubes ;
- Le remplissage des tubes sera facilité par un dispositif installé à cet effet à une extrémité des tubes. Ce système de remplissage sera prévu de façon à permettre la dilatation des MCP lors de leur fonte, sans apparition de contraintes mécaniques majeures.
- L'amélioration de la conductivité se fera en ajoutant un élément ayant une bonne conductivité (graphite ou un fil de fer) au cœur des tubes contenant des MCP.

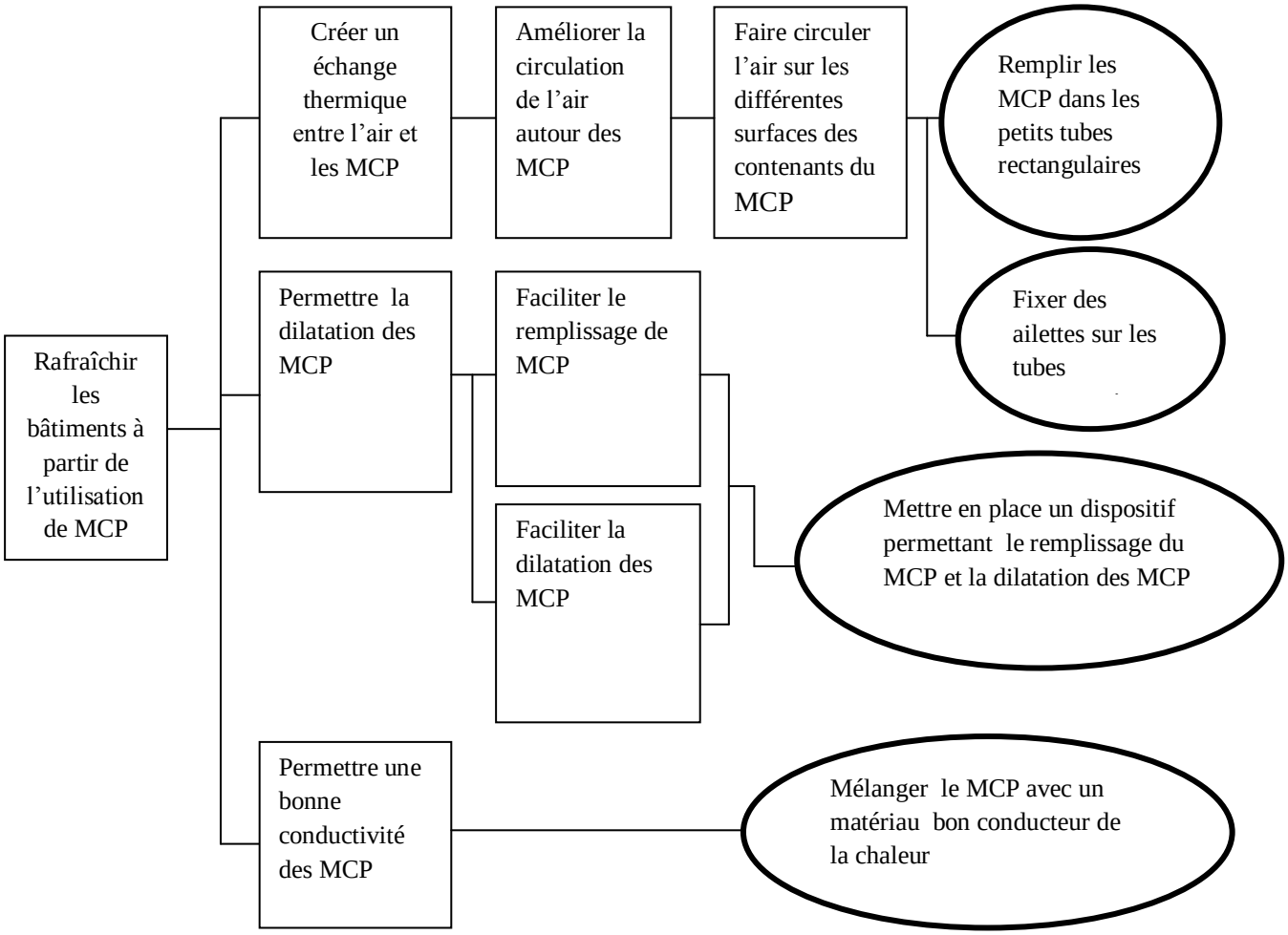



*Figure 39 : Diagramme Fast du système*

### IV.3.3.2 – Différents composants du système

Un composant est une entité qui permet de mener une action bien précise. De ce fait, les fonctions de l'échangeur peuvent se regrouper en deux composants (Figure 40) :

- Composant 1 : MCP macro  encapsulés (et système de remplissage et de dilatation des MCP) ;
- Composant 2 : Circuit d'air.

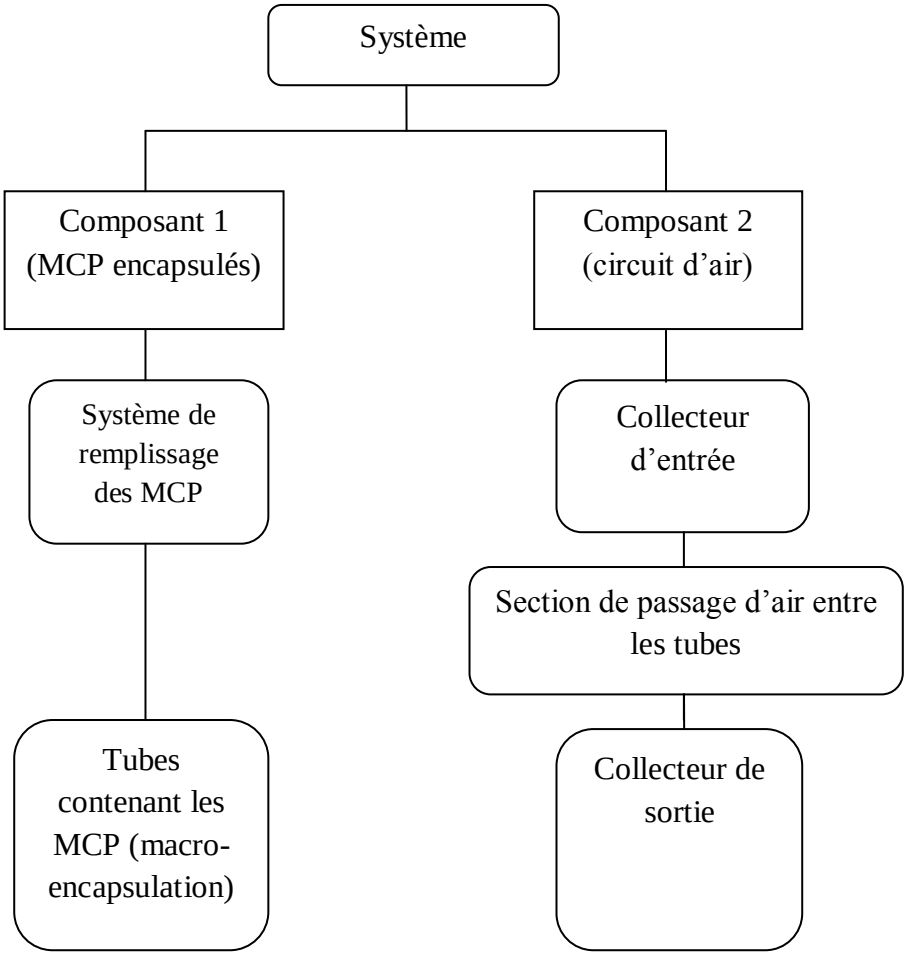



*Figure 40 : Organigramme technique du système*

### IV.3.3.3 – Les blocs diagrammes fonctionnels du système

Nous représentons ci-dessous (Figure 41) un diagramme fonctionnel de l'échangeur et des 2 milieux extérieurs auxquels il est connecté : l'air extérieur et l'air intérieur à la maison Napévomo. Celui-ci laisse apparaitre :

- 1 circuit d'air en amont ;
- 1 circuit d'air en aval ;
- 1 collecteur d'air en amont ;
- 1 collecteur d'air en aval ;
- 1 caisson MCP contenant des tubes (eux-mêmes contenants le MCP) et un système de remplissage des MCP et de dilatation de ceux-ci ;
- 1 ventilateur permettant la circulation de l'air dans le caisson MCP.

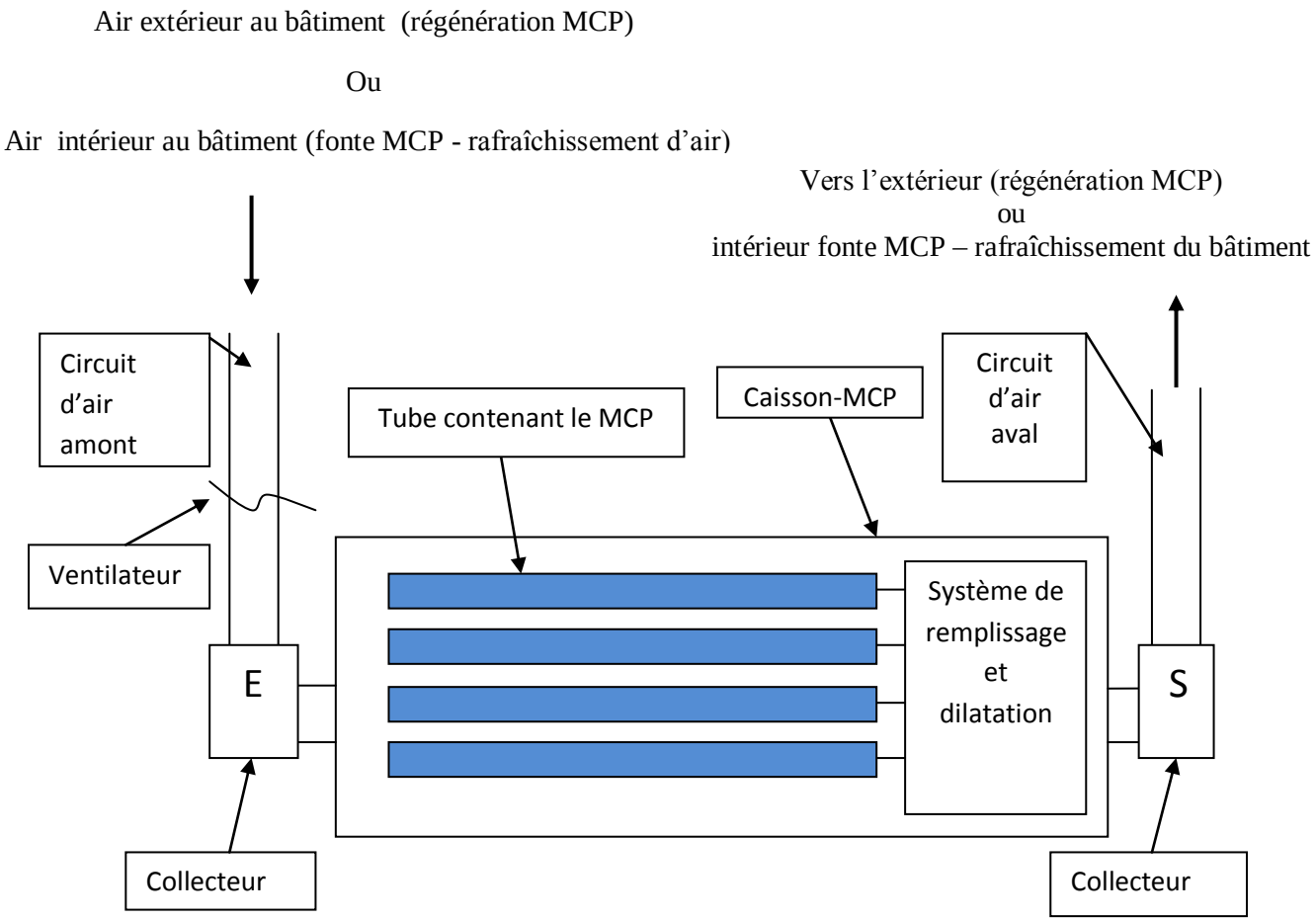



*Figure 41 : Blocs diagrammes fonctionnels du système*

### *IV.4 – Le choix de matériaux de l'échangeur*

#### IV.4.1 – Choix du MCP

Le choix des Matériaux à Changement de Phase utilisés a été effectué selon 3 critères :

- (1) pour un air entrant dans l'échangeur à 25 °C, celui sortant doit être à 23 °C pour des raisons de confort (cf. § IV.1.2) et de règles imposées par le Solar Décathlon Europe 2010 ;

- (2) les MCP doivent être aptes à se reconsolider la nuit, par échange avec l'air issu de l'extérieur du bâtiment circulant dans l'échangeur ;

- (3) ces matériaux doivent être suffisamment fluides à des températures de 30 °C à 40 °C, de façon à assurer un remplissage aisé des tubes par les MCP en phase de fabrication de l'échangeur.

La température de l'air extérieur nocturne à l'occasion du concours Solar Décathlon Europe 2010 (juin 2010) est selon les données météo logiques sur les années 1999 - 2009, compris entre 17 °C et 19 °C. Nous avons donc retenu des MCP dont la température de changement de phase annoncée par leur fabricant est supérieure à 20 °C. La consigne de température de l'air en sortie d'échangeur choisi est de 23 °C. Nous avons donc retenu un MCP dont la température de changement de phase annoncée est inférieure à 23°C. Le matériau retenu est ainsi une paraffine de type RT21 commercialisée par la société rubitherm ®. Sa plage de fonte annoncée est entre 18 °C et 23 °C avec une température moyenne de fusion à 21 °C ; sa plage de solidification annoncée est située entre 22 °C et 19 °C avec une température principale de solidification à 22 °C. Sa chaleur latente de changement de phase annoncée est de 134 kJ/kg. Sa chaleur massique annoncée est environ à 1,7 kJ/kg.K (annexe 3). Sa conductivité annoncée est de 0,2 W/m.K.

En prévision de l'éventualité d'une température atmosphérique élevée supérieur à 20 °C mais aussi pour avoir sur Madrid une possibilité de rafraîchir la maison Napévomo après des phases de visites grands publics (de 11 h à 14 h puis de 17 h à 19 h chaque jour), nous avons choisi de fabriquer aussi des échangeurs avec un

MCP ayant une température moyenne de fusion de 28 °C (RT28 HC commercialisé par la société Rubitherm ®). Ce MCP est aussi un produit à base de paraffine, sa plage de fonte est comprise entre 27 °C et 28 °C avec une température principale de fusion à 28 °C. Sa plage de solidification annoncée est entre 28 °C et 27 °C avec une température principale de solidification à 27 °C. Sa chaleur latente de changement de phase annoncée est 245 kJ/kg et sa conductivité est 0,2 W/m.k.

### IV.4.2 – Caractérisation des MCP

L'un des problèmes auquel sont confrontés les utilisateurs des MCP est que les fournisseurs de ces matériaux ne donnent que des informations approximatives sur les MCP.

Pour cette raison, de façon à effectuer un dimensionnement de l'échangeur précis, nous avons dans un premier mesuré la chaleur latente et déterminé la plage de fonte des MCP utilisé. La capacité calorifique du matériau, de valeur quasi-identique que celui-ci soit fondu ou solide, est aussi obtenu sur le matériau fondu.

Pour réaliser ces mesures, nous avons utilisé un analyseur calorimétrique différentiel à balayage à flux de chaleur DSC 131 automatisé de marque SETARAM (Differential Scanning Calorimetry).
La démarche expérimentale utilisée, consiste à mesurer au cours du temps simultanément la température d'un petit échantillon (30 mg environ dans un contenant cylindrique à fond plat en graphite) et le flux de chaleur fourni à celui-ci. Ce flux de chaleur est imposé de façon à ce que l'échantillon suive une montée en température fixée par l'opérateur.

La Figure 42 représente respectivement la montée en température imposée (1°C/mn) et le flux de chaleur apporté à l'échantillon (en face arrière du fond plat du contenant).

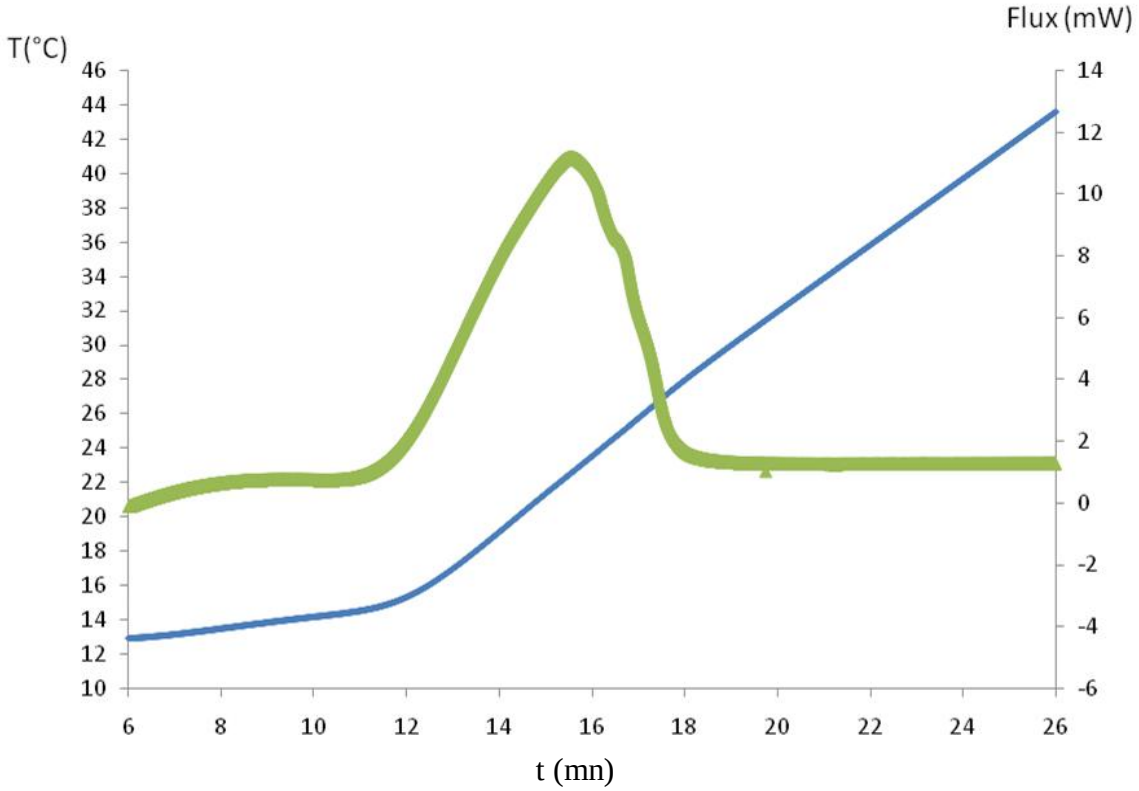



*Figure 42 : Evolution temporelle de la température de consigne du MCP RT21 (ligne continue épaisse) et du flux de chaleur reçu par ce MCP (en ligne continue fine) en fonction du temps.*

L'aire sous le pic situé entre t = 11 mn et t = 18 mn est le surplus d'énergie fourni à l'échantillon de MCP (de masse connue) pour assurer intégralement son changement de phase (fonte). Il permet d'accéder à la chaleur latente de fusion-solidification. Pour chaque intervalle de l'axe des temps [t ; t+dt] de ce pic, la fraction d'aire sous ce pic est l'énergie nécessaire au changement de phase de la fraction de MCP fondant sur l'interval de température [T ; T+dT] correspondant et correspond à la fraction (%) de MCP fondu sur cette intervalle de température. Il est ainsi possible de tracer le % cumulé de MCP fondu en fonction de la température de celui-ci (cf. Figure 43).

La Figure 43 laisse apparaître pour le RT 21 que 20% du matériau du MCP fond en dessous de 20°C, et que 40% du MCP fond au-dessus de 23°C. En conséquence, seul 40% du MCP est réellement utilisable pour la fonction de refroidissement diurne et de régénération nocturne souhaitée. C'est la raison pour laquelle une durée de

fonctionnement de 30 heures, c'est-à-dire 2,5 fois supérieure à celle en situation réelle (12 heures), sera considérée lors du dimensionnement du système envisagé.

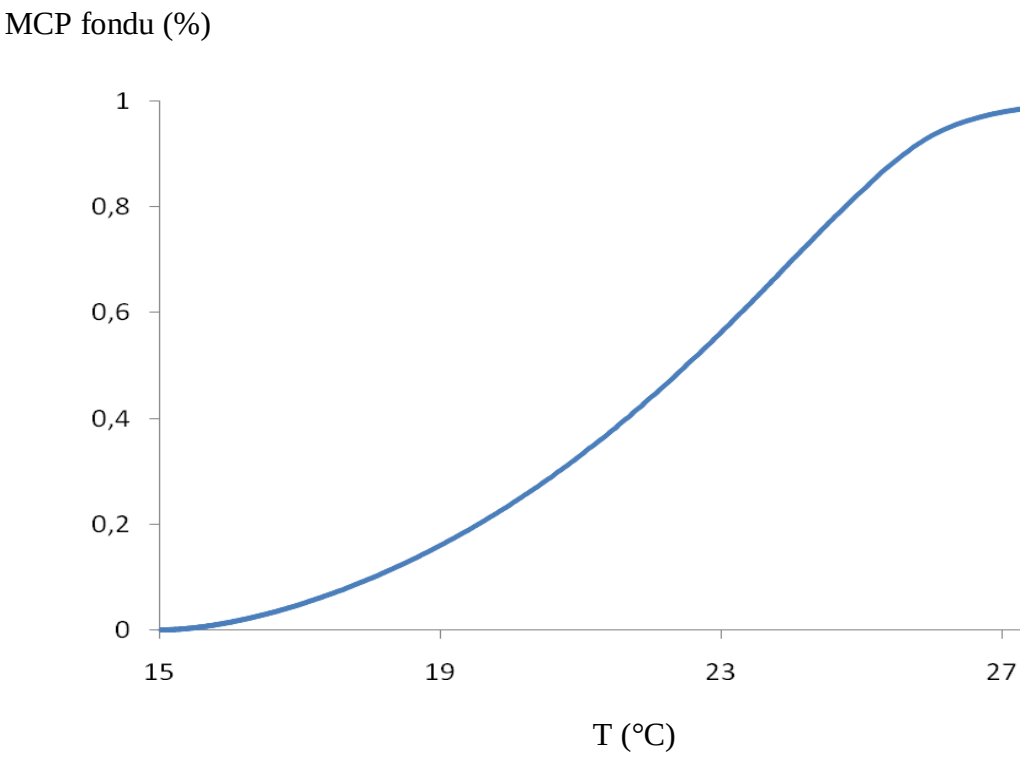



*Figure 43 : Fraction de MCP fondu en fonction de la température (RT21)*

Sur plusieurs échantillons, la valeur moyenne de la chaleur latente de changement obtenue est de 93 kJ/kg, (soit 30% inférieure à celle annoncée par le fabriquant) et la valeur moyenne de sa chaleur massique est 1,3 J/kg.K environ (soit 30% inférieure à celle annoncée par le fabriquant).

### IV.4.3 – Choix des matériaux des tubes contenant le MCP

Les travaux que nous avons menés ont été réalisés au sein de l'atelier de formage d'Art et Métiers ParisTech, campus de Bordeaux-Talence. A cet effet, nous avons tenu compte du savoir-faire des techniciens et des possibilités techniques de leur atelier. Les critères les plus importants pour cette fabrication sont le coût d'investissement, la faisabilité de fabriquer les différentes pièces du dispositif au sein de l'atelier et la conductivité des matériaux utilisés pour fabriquer les tubes contenant

les MCP. Lorsque l'on regarde le Tableau 19, l'aluminium est un matériau que les techniciens de l'atelier peuvent souder convenablement. De ce fait, le coût d'investissement était plus abordable pour une fabrication en aluminium que pour une fabrication en plastique ou en polystyrène

| **Critères** | Les différents matériaux que l'on peut utilisée pour le stockage des MCP | | |
|---|---|---|---|
| | **Aluminium** | **Plastique PVC** | **Polystyrène blanc** |
| Prix de l'unité (1 tube) | 23,27 € | 25,08 € | 24 € |
| Estimation du coût de fabrication | gratuit (pour le contexte) car les travaux sont réalisés aux ateliers de l'ENSAM. Les techniciens savent travailler sur l'aluminium. | Important car la plus part des travaux se font à l'extérieur de l'ENSAM. | |
| Masse volumique | $\rho = 2690$ kg/ $m^3$ | $\rho = 1718$ kg/ $m^3$ | $\rho = 1600$ kg/ $m^3$ |
| Conductivité | 200-237 W /(m.K) | 46-62 W/(m.K), | 8-10 W/(m.K) |
| Coefficient de dilatation à 20°C | ≈ 23 10-6 m/ K | | |
| Résistance au choc thermique | Supporte les chocs thermiques | | |
| oxydation et de corrosion | Sensible à la corrosion, mais à la corrosion limitée (voir stoppée) par l'aluminium et non préjudiciable au transfert de chaleur) | Insensible à la corrosion | Insensible à la corrosion |
| environnement | Peu recyclable | Recyclable | Recyclable |

*Tableau 19 : Comparaison des matériaux utilisables pour la conception du système*

Indépendamment de ce coût de fabrication des tubes, notre choix de matériau de construction a été vers un matériau stable dans le temps et fortement conducteur de la chaleur. L'aluminium a donc été retenu. Les tubes retenus sont de section rectangulaire comme nous le verrons par la suite, les dimensions de cette section seront faibles (40 mm x30 mm) de façon à ce que la faible conductivité des MCP ne soit pas un frein aux transferts de chaleur air-aluminium-MCP.

### *IV.5 – Conclusion*

Dans ce paragraphe, nous avons présenté les différentes étapes que nous avons menées pour obtenir les différents concepts du système. Nous avons d'abord établi notre Cahier des Charges où nous avons estimé les besoins énergétiques de la maison Napévomo et lister les différents contraintes pesant sur le système envisagé. Ensuite, nous avons mené une démarche de conception de façon à définir les fonctions (principales, de services et secondaires) du système de stockage. Ceci nous amené à définir un système de stockage sous forme d'un échangeur de chaleur ayant des tubes contenants des MCP.

Le fonctionnement du système est :

Fonctionnement diurne (refroidissement d'air)

Durant la journée, lorsqu'il y a un besoin de rafraichissement, l'air de la maison passe dans des caissons-MCP (cf figure 44) situés dans le plancher de celle-ci. Dans ces caissons sont placés des tubes en aluminium remplis de MCP. Ces matériaux, soumis à une température supérieure à leur température de fusion vont fondre en absorbant la chaleur de la maison; l'air réinjecté dans la maison va donc être plus frais (Figure 44).

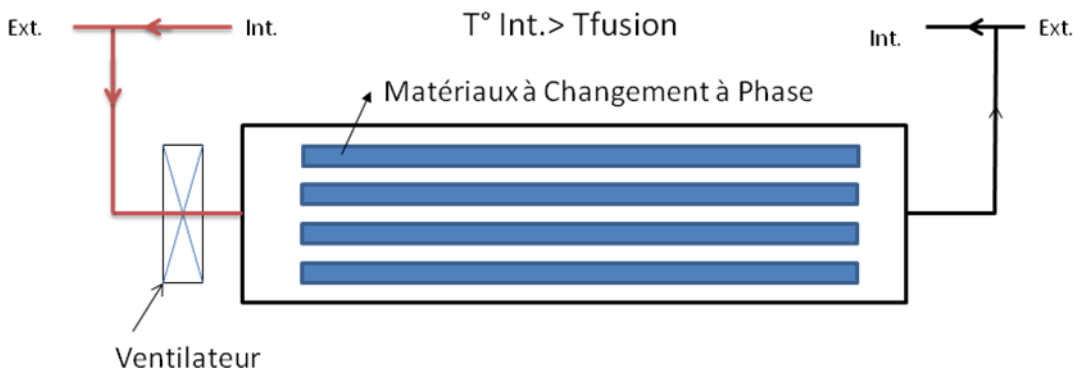



*Figure 44 : Schéma du fonctionnement diurne du système*

Fonctionnement la nuit (régénération des MCP)

La nuit, lorsque la température extérieure à la maison redescend, on fait circuler l'air extérieur dans les caissons afin de solidifier les MCP fondus. Pour cela la température extérieure doit être inférieure à la température de solidification des matériaux (Figure 45).

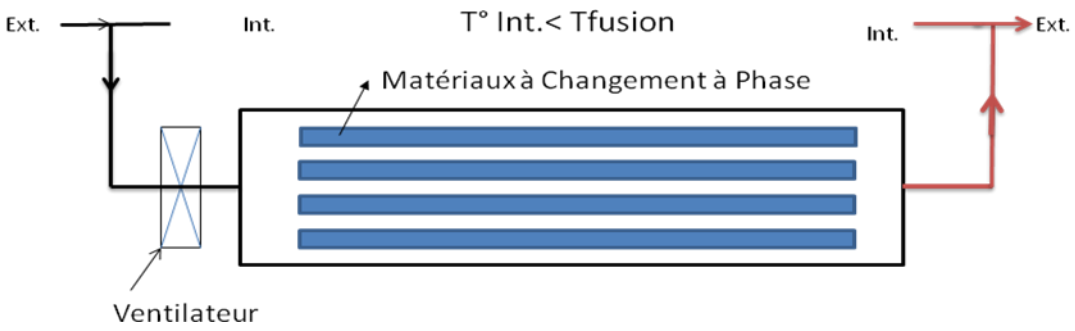



*Figure 45 : Schéma du fonctionnement nocturne du système la nuit*

Dans le chapitre suivant, nous présentons la modélisation NUT - ε que nous avons mis en place pour dimensionner le système.

## V – Modélisation et dimensionnement du système

L'ensemble considéré est le lieu où nous avons des échanges thermiques (échangeur air-MCP); il est composé de quatre éléments : le caisson MCP (en bois), les contenants le MCP (tubes d'aluminium), le MCP et le circuit aéraulique. Nous proposons dans ce chapitre d'écrire le modèle qui renferme les différentes équations qui traduisent les transferts de chaleur dans ce système, ceci dans un but de quantifier la masse de MCP dont on a besoin pour rafraîchir le bâtiment et de pré-dimensionner les différents éléments qui assurent le bon fonctionnement du système.

Le modèle physique mis en œuvre a pour but de pré-dimensionner le système en s'assurant que la solution tient compte du Cahier des Charges ;

A cet effet, nous considérons que notre modèle physique est composé de quatre modèles :

- le modèle de calcul de la vitesse de l'air dans l'échangeur ;
- le modèle de calcul du coefficient global d'échange air-MCP ;
- le modèle de calcul des dimensions du système, notamment la longueur de l'échangeur ;
- le modèle de calcul des pertes de charge.

### *V.1 – Le modèle de calcul de la vitesse de l'air*

Pour estimer la vitesse de l'air dans les caissons, nous utilisons un certain nombre d'hypothèses compte tenu de l'environnement de l'étude, notamment :

- la puissance de refroidissement est constante dans le temps. Elle est environ de 2300 W (cf. § IV.1.1.4) ;
- l'écoulement est considéré incompressible ;
- les variations de température normale à la direction du flux ne sont pas prises en compte ;
- la température d'air en sortie de l'échangeur est de 23 °C ;

- la différence de température d'air entre l'entrée et la sortie de l'échangeur est de 2 °C (cf. § IV.1.2.) ;

  Remarque : les besoins de la maison Napévomo (en terme d'énergie de refroidissement et en terme de puissance maximale de refroidissement) ont été estimés sur une base d'une température de consigne d'air intérieur T < 28°C, ceci pour être cohérent avec les labels Effinergie et PassivHaus. Le dimensionnement de l'échangeur est basé sur ces besoins, bien que voulant assurer une température de consigne T < 25°C pour les besoins du concours SDE 2010. Ceci conforte notre choix, étayé sur les résultats de caractérisation des MCP (Figure 43, § IV 4.2), de dimensionner notre système pour un fonctionnement diurne étalé sur 30 heures. De plus, la valeur de la puissance à atteindre a été ici rehaussé à 2500 W, soit à une valeur légèrement supérieure à son estimation (2273 W, cf. § IV 1.1.4). A partir de ses hypothèses, le débit massique d'air au travers de l'échangeur de chaleur peut s'écrire comme suit :

$$Q_{m\,air} = \frac{Pe}{Cp_{air} \cdot (T_s - T_e)} \qquad \text{(V.1)}$$

Où $Cp_{air}$ est la chaleur massique de l'air et Pe est la puissance de refroidissement souhaitée. De plus la vitesse moyenne de l'air entre les contenants de MCP peut s'écrire comme suit :

$$V_{air} = \frac{Q_{mair}}{\rho_{air} \cdot S} \qquad \text{(V.2)}$$

Où $\rho_{air}$ est la masse volumique de l'air et S la section de passage de l'air entre les tubes contenant les MCP.

### *V.2 – Le modèle de calcul du coefficient d'échange*

Le coefficient d'échange est très important dans l'estimation des caractéristiques d'un échange thermique. Dans le cas d'une interface complexe composée de plusieurs surfaces d'échange placées en parallèle comme la nôtre (cf Figure 41), il traduit de

manière empirique les échanges de chaleur de l'intérieur avec l'extérieur c'est-à-dire il indique la facilité avec laquelle l'énergie thermique passe au travers la surface d'échange.

Pour calculer le coefficient d'échange thermique nous avons émis les hypothèses suivantes :

- les propriétés physiques et thermiques des phases liquide et solide PCM sont les mêmes ;
- les énergies cinétiques et potentielles sont négligeables vis-à-vis de l'enthalpie du système du MCP.

De ce fait, nous calculons d'abord les nombres additionnels :

- Nombre de Reynolds (Re) qui permet de caractériser l'écoulement en faisant intervenir la vitesse du fluide (l'air) :

$$\mathrm{Re} = \frac{\rho_{air} \cdot V_{air} \cdot D_h}{\mu_{air}} \qquad \text{(V.3)}$$

Où $D_h$ est le diamètre aéraulique (rapport entre la section de passage d'air dans le caisson et le périmètre mouillé de cette section) et $\mu_{air}$ est la viscosité dynamique de l'air.

- le Nombre de Prandtl (Pr) qui permet de caractériser le fluide circulant (air) :

$$\mathrm{Pr} = \frac{\mu_{air} \cdot C_{p_{air}}}{\lambda_{air}} \qquad \text{(V.4)}$$

Où $\lambda_{air}$ est la conductivité de l'air et $Cp_{air}$ sa chaleur massique.

- le nombre Nusselt (Nu) qui permet de caractériser les échanges thermiques convectifs :

$$Nu = \frac{h_{conv} \cdot e_{air}}{\lambda_{air}} \qquad \text{(V.5)}$$

Où $e_{air}$ est une distance caractéristique entre les tubes. Pour un écoulement d'air parallèle à une plaque plane, ce Nusselt s'exprime comme suit (Nadeau, 1998) :

$$Nu^{(1)} = \left(3.66^3 + 1.61 \cdot \left(\mathrm{Pr} \cdot \mathrm{Re} \cdot\right)\right)^{0.33} \qquad \text{(V.6)}$$

$$Nu^{(2)} = 1.86 \cdot \left(\mathrm{Pr} \cdot \mathrm{Re} \cdot\right)^{0.33} \qquad \text{(V.7)}$$

$$Nu^{(3)} = 0.116 \cdot \left(\mathrm{Re}^{0.66} - 125\right) \cdot \mathrm{Pr}^{0.33} \quad \text{(V.8)}$$

$$Nu^{(4)} = 0.023 \cdot \mathrm{Re}^{0.8} \cdot \mathrm{Pr}^{0.33} \quad \text{(V.9)}$$

$\mathrm{Re} < 900$ $\quad NU = Nu^{(1)}$ (V.10)

$900 \leq \mathrm{Re} < 1100$ $\quad NU = (Nu^{(2)} - Nu^{(1)})/ (1100\text{-}900).\mathrm{Re}$ (V.11)

$1100 \leq \mathrm{Re} < 2100$ $\quad NU = Nu^{(2)}$ (V.12)

$2100 \leq \mathrm{Re} < 8000$ $\quad NU = Nu^{(3)}$ (V.13)

$8000 \leq \mathrm{Re} < 10^4$ $\quad NU = (Nu^{(4)} - Nu^{(3)})/ (10^4\text{-}8000).\mathrm{Re}$ (V.14)

$10^4 \leq \mathrm{Re} < 10^6$ $\quad NU = Nu^{(4)}$ (V.15)

Ensuite, nous calculons le coefficient d'échange convectif de l'air $h_{\mathrm{conv}}$ qui permet d'exprimer la part de la convection sur le transfert de chaleur air-MCP. Ce calcul du coefficient d'échange convectif s'écrit :

$$h_{conv} = \frac{\lambda_{air} \cdot Nu}{e_{air}} \quad \text{(V.16)}$$

Par la suite, nous calculons le coefficient global d'échange H comme suit :

$$H = \frac{1}{\frac{1}{h_{conv}} + \frac{e_{alu}}{\lambda_{alu}} + \frac{e_{MCP}}{\lambda_{MCP}}} \quad \text{(V.17)}$$

où $e_{alu}$ est l'épaisseur des parois des tubes d'aluminium, $\lambda_{conv}$ est la conductivité de l'aluminium, $e_{mcp}$ l'épaisseur du MCP (distance moyenne des parois intérieures des tubes au cœur du MCP), $\lambda_{MCP}$ la conductivité du MCP.

### *V.3 – Le modèle de calcul des dimensions de l'échangeur*

Dans un premier temps nous émettons un certain nombre d'hypothèses, notamment :

- Le caisson-MCP (en bas) est parfaitement isolé (pas d'échange de chaleur avec l'environnement du caisson-MCP);
- les MCP sont homogènes isotropes et parfaitement purs. Il n'y a pas d'air emprisonnés dans les MCP et le changement de phase est isotherme ;
- la température de fusion des MCP est 21°C ;

- la chaleur spécifique est uniforme dans le MCP.

Pour déterminer les dimensions de l'échangeur notamment la longueur nécessaire de l'échangeur, nous utilisons la méthode du Nombre d'Unités de Transfert NUT. Elle traduit la proportionnalité du flux thermique transmis à la surface d'échange à l'écart global de température entre l'entrée et la sortie du fluide.

Pour ce faire, nous calculons d'abord l'efficacité de rafraichissement du système ε comme suit :

$$\varepsilon = \frac{T_e - T_s}{T_e - T_f} \tag{V.18}$$

Où $T_f$ est la température de fusion du MCP.

A partir de cette donnée, nous calculons le NUT, pour la géométrie considérée (tubes parallèles à l'écoulement d'air) de la manière suivante (Nadeau, 1998):

$$NUT = \frac{1}{1-R}\ln\left(\frac{1}{1-\varepsilon}\right) \tag{V.19}$$

Où R est le rapport des capacités

Dans notre cas, le flux de MCP étant fixé, à partir de l'équation V. 19, la longueur nécessaire « L » des tubes contenants les MCP peut s'écrit comme suit :

$$L = \frac{NUT}{H} \cdot Q_{mair} \cdot Cp_{air} \tag{V.20}$$

On peut alors calculer les grandeurs suivantes :

- le volume « V » de MCP comme suit :

$$V = e_{mcp} \cdot L \cdot l_{mcp} \tag{V.21}$$

où $l_{mcp}$ est la largeur du tube contenant le MCP.

- la masse de MCP « M » :

$$M_{mcp} = 1000 \cdot V_{mcp} \cdot d_{mcp} \tag{V.22}$$

où $d_{mcp}$ représente la densité des MCP

- la durée de fonctionnement « t » en rafraîchissement du bâtiment (à la puissance constante Pe fixée) ou durée de régénération des MCP :

$$t_s = \frac{M_{mcp} \cdot L_{mcp}}{P_e} \qquad \text{(V.23)}$$

- le taux de renouvellement d'air « $R_t$ », pour vérifier s'il n'est pas trop élevé :

$$R_t = \frac{Q_{mair}}{V} \qquad \text{(V.24)}$$

Où $V$ est le volume de la maison Napévomo.

La feuille de calcul Excel correspondant aux équations V.1 à V.22 est présentée sur la Figure 46.

| | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | | | | T fusion | 294 | K |
| Cp air | 1003 | J/kg.K | | | | | | | | |
| Rho air | 1,29 | kg/m3 | | | | | | | | |
| Mu air | 1,80E-05 | kg/m.s | | | | | | MCP RT 21 | | |
| Lambda air | 0,025 | | Lambda alu | 45 | | | | Lambda MCP | 0,2 | |
| | | | e alu | 0,0015 | m | | | e MCP | 0,0261429 | m |
| | | | | | | | | chaleur L | 100000 | J/kg.K |
| | | | Vol. maison | 115 | m3 | | | densite | 0,84 | kg/l |
| | | | Nbre caissons | 5 | | | | | | |
| | | | N | 7 | Nombre de fentes | | | | | |
| | | | l | 0,31 | m (Largeur fente) | | | | | |
| | | | e | 0,027 | m (Epaisseur fente) | | | | | |
| | | | $e_{MCP}$ | 0,026142857 | m | | | | | |
| | | | $e_{air}$ | 0,027 | m | | | | | |
| Puissance totale système MCP | | | | | | | | | | |
| 600 | W | | | | | | | | | |
| | | | qm (volumique) | 166,9410374 | Taux de renouvellement d'air | 7,258306 | | | | |
| Te | 298 | K | qm (massique)(kg/s) | 0,059820538 | Epsilon | 0,5 | | Ts | 296 | K |
| Pe | 120 | W | vair (m/s) | 0,791474831 | NUT | 0,6931472 | | | | |
| | | | Re | 2817,603428 | A | 2,2995737 | m² | | | |
| $P_{elec\ max}$ | 24 | W | Pr | 0,72216 | L | **3,4118304** | m (longueur échangeur) | | | |
| | | | Nu | 7,752298894 | | | | | | |
| | | | h-conv | 3,901619963 | | | | | | |
| | | | **H-éch** | **2,58363609** | | | | | | |

*Figure 46 : Feuille de calcul de l'échangeur pour le MCP RT 21*

Dans cette feuille de calcul, nous avons à droite les caractéristiques de l'air et à gauche celles du matériau à changement de phase qui est installé dans l'échangeur. Au milieu de la feuille de calcul, nous avons les caractéristiques de l'aluminium où se sont logés les MCP et les dimensions intervenantes dans le système. En bas de la feuille, nous avons notre code de calcul où nous estimons les caractéristiques dont nous avons besoin.

### *V.4 – Le modèle de calcul des pertes de charge*

Le calcul des pertes de charge nous permet d'obtenir les caractéristiques d'un ventilateur qui peut créer autant de charge que les pertes de charge pour le débit d'air maximum considéré. Si ce ventilateur existe et si sa consommation électrique est raisonnable au regard de la puissance de refroidissement d'air, alors la solution est validée. Dans le cas contraire, la recherche de solution continue. Le calcul des pertes de charge du système a été estimé à partir du circuit aéraulique de l'ensemble présenté sur la Figure 47. Il s'agit des caissons-MCP en parallèle prévus pour la maison MCP. Elle se fait en deux étapes : dans un premier temps, nous faisons une analyse des différents connections du circuit aéraulique de notre système. Ensuite nous calculons les pertes de charge de chaque fonctionnement (journalier et nocturne).

Nous prenons la valeur supérieure des pertes de charge en fonctionnement journalier et en fonctionnement nocturne.

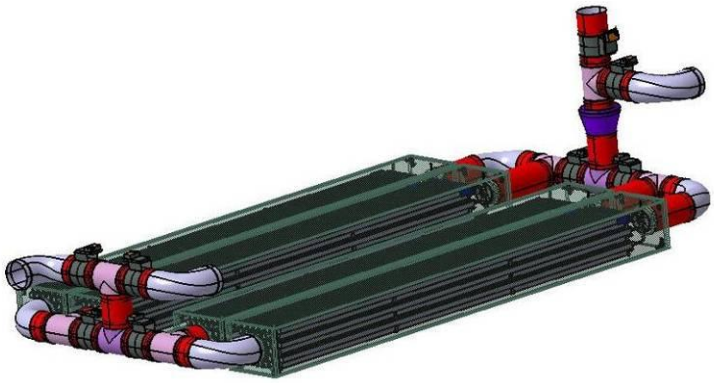


*Figure 47 : Circuit aéraulique du système de rafraîchissement*

Analyse des différents connections du circuit aéraulique

A partir du circuit aéraulique du système de rafraîchissement (cf Figure 47), nous avons réalisé le schéma aéraulique (cf Figure 48).

A partir de ce dernier, nous faisons l'inventaire des différents connections du circuit aéraulique (Tableau 20) pour calculer les pertes de charge du système de rafraîchissement.

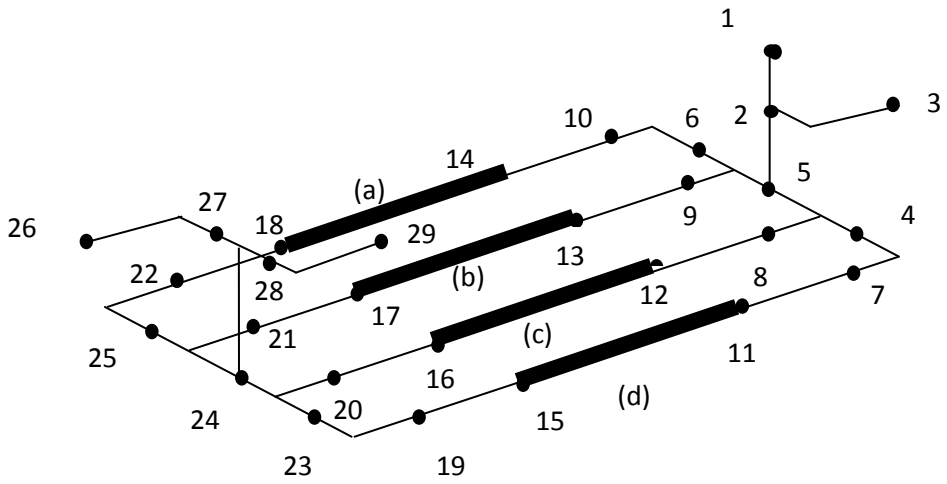



Figure 48 : Schéma (vue en perspective) des différentes connections des éléments du système

| Connexions | Circuits d'air |
|---|---|
| 1-2 | Gaine circulaire où l'air rafraîchit arrive dans la maison. |
| 2-3 et 27-26 | Gaine ayant un coude à 90° qui relient le système avec l'air extérieur de la maison. |
| 4-7; 6-10; 19-23; 22-25 | Gaine ayant un coude à 90° reliant les deux caissons-MCP des bords du système et le reste du circuit. |
| 6-9-5; 5-8-4; 20-23-24; 24-21-25 | Gaines en forme de T qui permettent d'assembler les deux caissons-MCP du milieu du système et le reste du circuit aéraulique. |
| 7-11; 8-12; 9-13; 10-14; 18-22; 17-21; 16-20; 15-19 | Gaines circulaires qui permettent d'assembler les caissons-MCP et le reste du circuit. |
| 11-15=12-16=13-17=14-18 | Caisson-MCP contenant les tubes contenant les MCP. |
| 29-28 | Gaine ayant un coude à 90°C où l'air de la maison arrive dans le système. |

*Tableau 20 : Différentes connections du système*

Les données utilisées lors des calculs des pertes de charge sont :

- les quatre caissons-MCP (a), (b), (c), (d) sont identiques dans la Figure 48;
- le circuit aéraulique du coffret (a) est le même que celui du coffret (d). De même le circuit aéraulique du coffret (b) est le même que celui du coffret (c).

A partir de ses données, on en déduit que certaines pertes de charge singulières et régulières de certaines parties du système sont identiques. Notamment :

* Les pertes de charge singulières :

6-3 = 28-29 ; 6-9-5 = 5-8-4 = 22-21-25 = 20-23-19 ;

* Les pertes de charge régulières :

7-11 = 8-12 = 9-13 = 10-14 ; 19-15 = 16-20 = 17-21 = 18-22

*Calcul des pertes de charge lors du fonctionnement diurne

La Figure 49 représente le circuit d'air lors du fonctionnement diurne du système de rafraîchissement. Comme vous l'avez remarqué, c'est le schéma de la Figure 48 où nous avons supprimé les conduites 2-3 et 26-27.

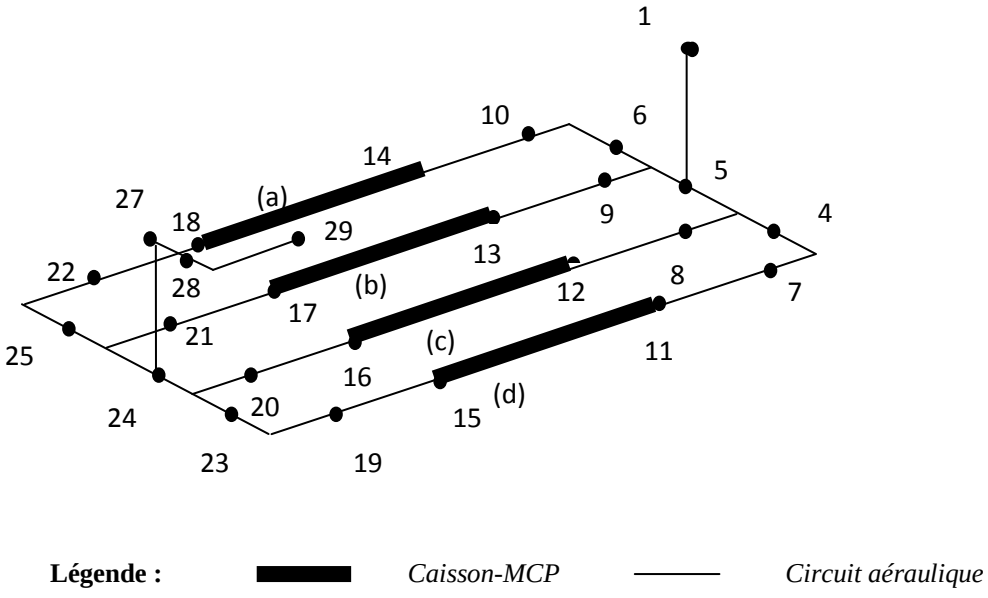



*Figure 49: Schéma aéraulique (vue en perspective) du système de rafraîchissement lors du fonctionnement diurne. Les lignes épaisses sont les caissons-MCP et les lignes continues sont les différentes gaines*

Dans un premier temps, nous calculons les pertes de charge de la partie gauche du circuit, notamment (I.E.I del'cik, 1986) :

* Conduites : 7-4 = 10-6 = 22-25 = 23-19 : ce sont des gaines avec des coudes à 90°. La relation retenue pour calculer les pertes de charge est la suivante :

$$\Delta P = \xi \ \rho_{air} \frac{V_{air_x}^2}{2} \qquad \text{(V.25)}$$

où $\xi$ = 0,53 est le coefficient des pertes de charge pour la géométrie retenue et $\rho_{air}$ masse volumique de l'air et $V_{air}$ la vitesse de l'air.

* Conduites : 7-11=8-12=9-13=10-14 : nous avons des gaines circulaires de section constante. La relation retenue est :

$$\Delta P = f_e \cdot \frac{A}{S} \cdot \frac{\rho_{air} \cdot V_{air}^2}{2} \qquad \text{(V.26)}$$

où $f_e$ est le coefficient de fanning, A est l'aire de la section du tube, S est la surface du tube contenant les MCP (surface de frottement).

* Conduites 7-4-8 = 9-6-10 : nous avons des conduites en forme de T. la relation retenue est :

$$\Delta P = \xi \cdot \rho_{air} \cdot \frac{V_{air2}^2}{2} \qquad \text{(V.27)}$$

Le coefficient de pertes de charge est :

$$\xi = 0{,}4 \cdot \left( \frac{V_{air2}}{V_{air1}} - 1 \right)^2 \qquad \text{(V.28)}$$

où $V_{air1}$ est la vitesse de l'air à l'entrée des gaines et $V_{air2}$ vitesse de l'air à la sortie des gaines.

* Conduites 22-18=21-17=20-16=19-15 : Ce sont des conduites circulaires. Elles sont fixées sur les coffrets rectangulaires. La relation retenue est :

$$\Delta P = \xi \cdot \rho_{air} \cdot \frac{V_{air_x}^2}{2} \tag{V.29}$$

où le coefficient de pertes de charge ξ est calculé comme suit :

$$\xi = \left[1 - \left(\frac{V_{air1}}{V_{air2}}\right)^2\right]^2 \tag{V.30}$$

* Conduites 10-14=9-13=8-12; Ce sont des conduites circulaires. Elles sont fixées sur les coffrets rectangulaires. La formule retenue est :

$$\Delta P = \xi \cdot \rho_{air} \cdot \frac{V_{air_x}^2}{2} \tag{V.31}$$

où le coefficient des pertes de charge ξ est calculé comme suit :

$$\xi = 0{,}5 \cdot \left[1 - \frac{V_{air2}}{V_{air1}}\right]^2 \tag{V.32}$$

* Conduites 22-25-21=20-23-19 : nous avons des conduites en forme de T, la relation retenue est :

$$\Delta P = \xi \cdot \rho_{air} \cdot \frac{V_{air_x}^2}{2} \tag{V.33}$$

où le coefficient des pertes de charge ξ est calculé comme suit :

$$\xi = 0{,}5 + \frac{V_{air1}^{\ 2}}{V_{air2}^{\ 2}} \tag{V.34}$$

* Conduites 11-15=12-16=13-17=14-18 : nous avons des pertes de charge régulières entre les tubes contenant les MCP et les pertes de charges singulières en entrée et sortie de ce réseau de tubes parallèles. La relation retenue est :

$$\Delta P = \frac{G^2}{2}\left[\frac{1-\sigma^2+K_c}{\rho_e} + f\ \frac{A}{S}\frac{1}{\bar{\rho}} + \frac{\sigma^2-1+K_e}{\rho_s}\right] \quad \text{(V.35)}$$

Avec $\bar{\rho} = \frac{\rho_{1e}+\rho_{1s}}{2}$ (V.36)

Où

G est la vitesse massique ;

σ est la rugosité surfacique ;

Ke est le coefficient de pertes de charge à l'entrée de l'échangeur ;

Ks est le coefficient de pertes de charge à la sortie de l'échangeur.

Fonctionnement nocturne

Lors du fonctionnement nocturne (Figure 50), nous faisons circuler l'air extérieur dans le système pour régénérer les MCP. On en déduit que :

ΔP nocturne = ΔP rafraîchissement – (ΔP conduite entrée rafraîchissement +ΔP conduite sortie rafraîchissement) + (ΔP conduite entrée nocturne. +ΔP conduite sortie nocturne)

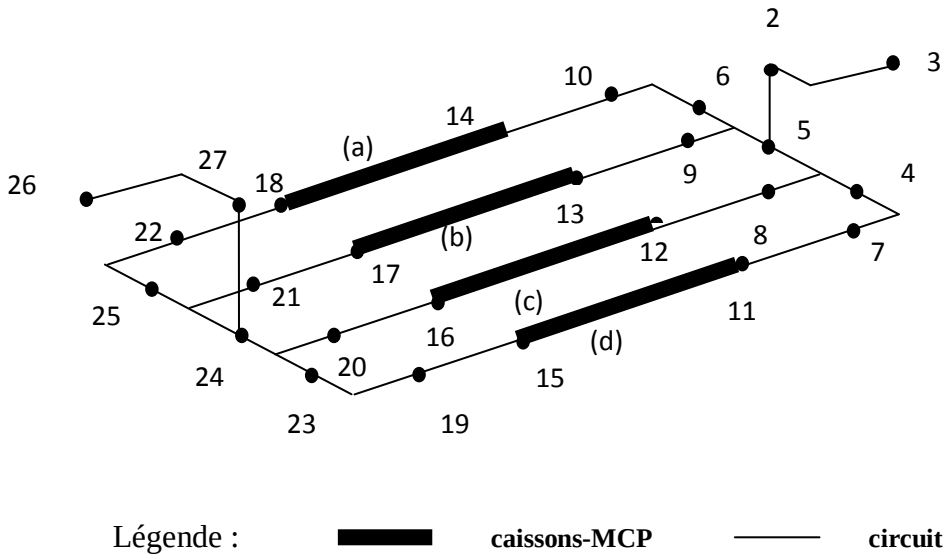



*Figure 50 : Schéma (vue en perspective) des différentes connections des éléments du système de rafraîchissement lors de la régénération des MCP. Les lignes épaisses sont les coffrets et les lignes continues sont les différentes gaines.*

Donc, il nous suffit de calculer des pertes de charge de l'entrée et à la sortie du circuit aéraulique pour estimer les pertes de charge du fonctionnement nocturne.

A cet effet, nous constatons que la conduite 26-27 qui est l'entrée du circuit aéraulique lors du fonctionnement nocturne est la même que conduite 2-3 qui permet d'évacuer l'air du circuit vers l'extérieur. Ce sont des gaines avec un coude à 90° mais de sens inverse.

De ce fait, La relation retenue pour calculer les pertes de charge dans la conduite 26-27 est :

$$\Delta P = \xi \ \rho_{air} \frac{V_{air_x}^2}{2} \qquad \text{(V.37)}$$

où le coefficient des pertes de charge est :

$\xi = 0{,}53$

La relation retenue pour calculer les pertes de charge dans la conduite 2-3 est :

$$\Delta P = \xi \ \rho_{air} \frac{V_{air_x}^2}{2} \tag{V.38}$$

où le coefficient des pertes de charge est :

$\xi = 0{,}48$

A partir de ses données obtenues, une feuille de calcul est établie. Elle nous permet de calculer les différentes pertes de charge en fonction des caractéristiques de l'air comme indique dans la Figure 51 (I.E.I del'cik, 1960).

Dans cette feuille, nous avons à gauche les calculs des pertes de charge régulières et à droites les pertes de charge singulières.
Les deux feuilles de calcul sur les échanges thermiques dans l'échangeur Air-MCP (Figure 46) et celle des pertes de charge dans celui-ci permettent de jouer sur certains paramètres d'entrée pour obtenir un résultat le plus satisfaisant possible comme l'indique l'algorithme de la Figure 52.
Tout d'abord, un processus itératif est effectué sur le modèle thermique de façon à obtenir des dimensions des composants de l'échangeur compatibles avec la puissance souhaitée, la durée de fonctionnement souhaitée, l'encombrement souhaitée. La solution obtenue est ensuite étudiée en termes de pertes de charge, et un ventilateur adapté (en termes de charge fournie et de consommation électrique raisonnable en regard de la puissance de refroidissement) est recherché. Si celui-ci existe, cette solution est validée comme étant une solution possible.

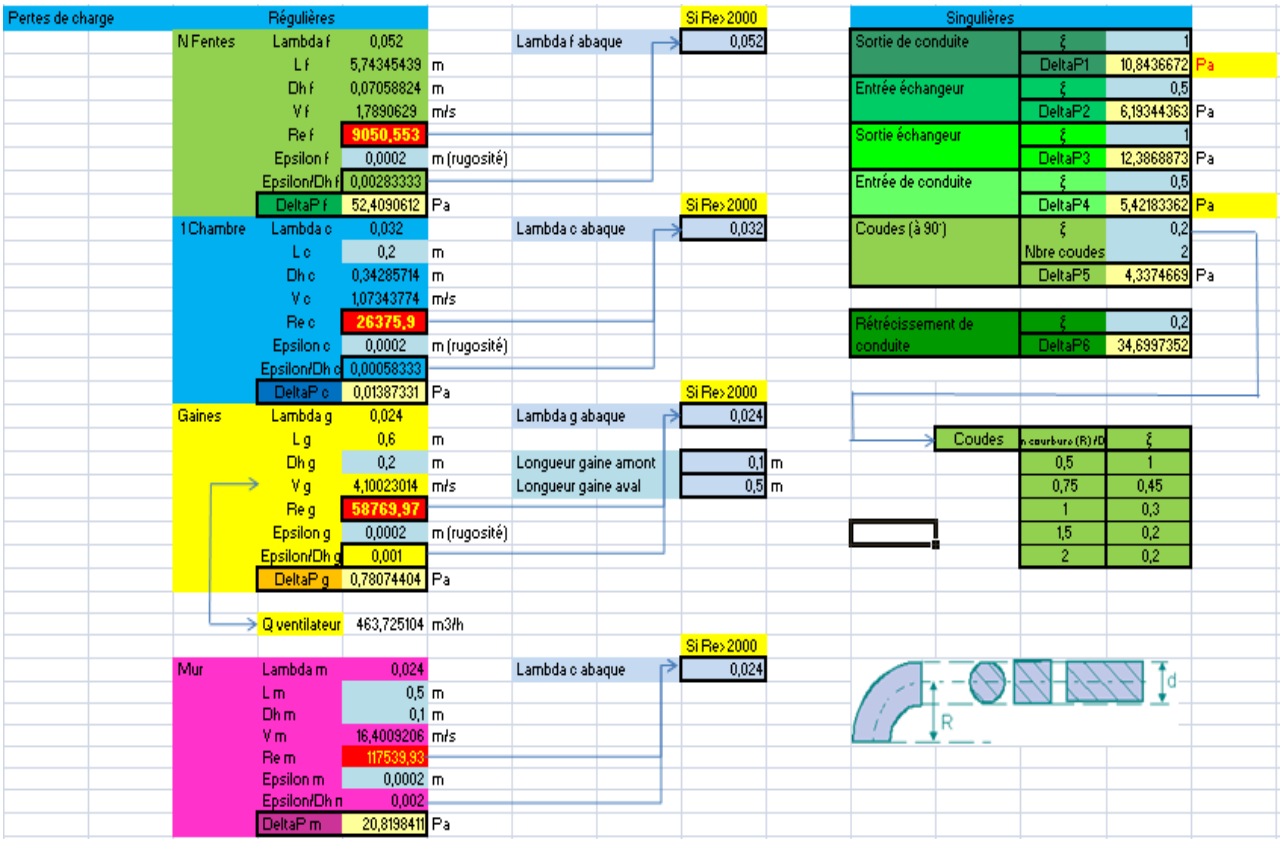



*Figure 51 : Feuille de calcul des pertes de charge du système conçu*

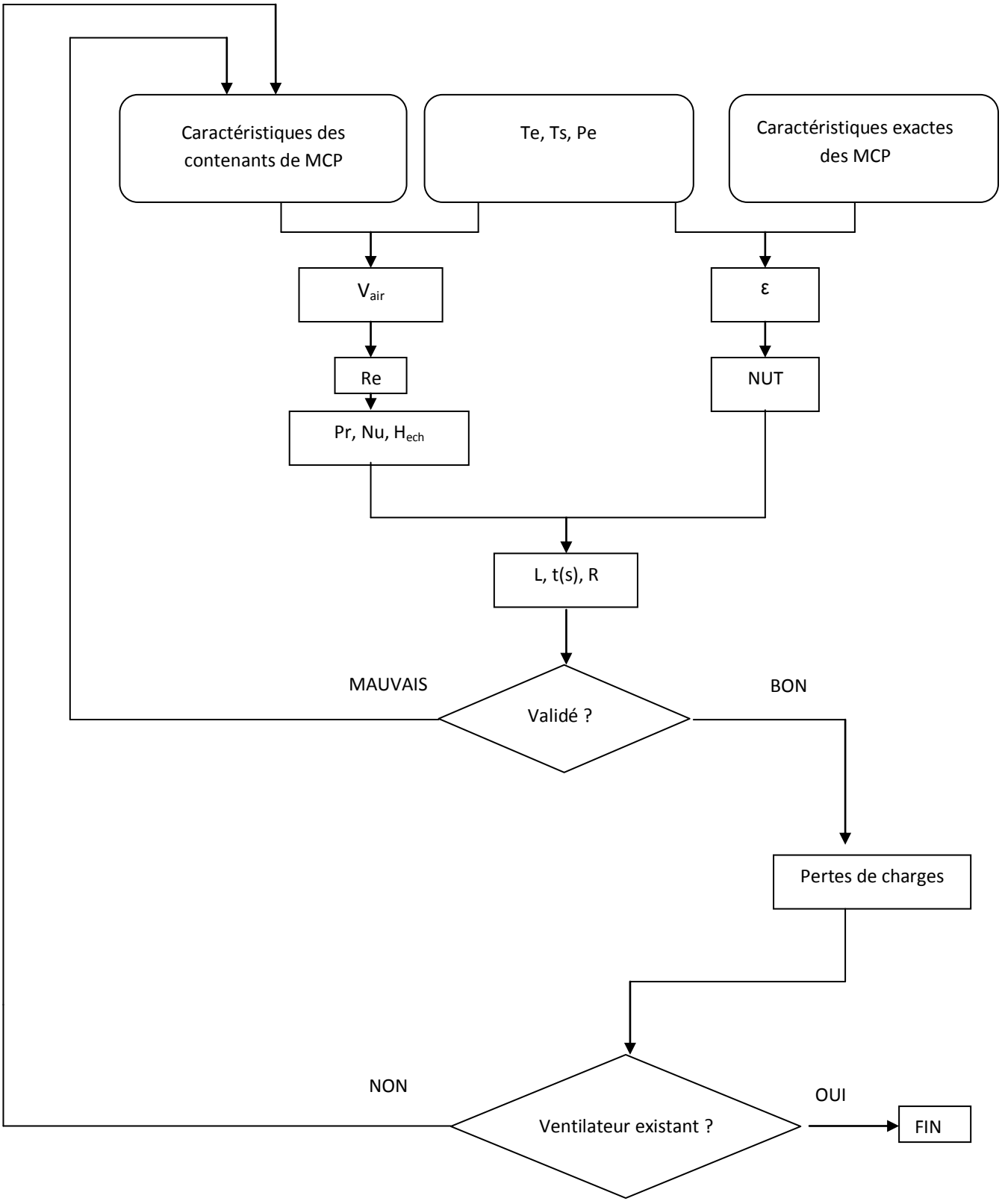



*Figure 52 : Algorithme de résolution du modèle physique du système*

### *V.5 – Conclusion*

Dans ce paragraphe, nous avons présenté les cinq modèles qui nous ont permis de dimensionner le système de rafraîchissement avec un certain nombre d'hypothèses. Il nous permet de déterminer un triplet de valeurs « distance inter-tubes (passage de l'air) » – « épaisseur élément de stockage d'énergie (contenant du MCP) » – « longueur des tubes » permettant à la fois d'assurer la puissance de refroidissement souhaitée (2500 W) et de déterminer le volume de MCP suffisant pour assurer cette puissance sur une durée assez longue (30 heures). Il permet aussi de limiter les pertes de charges (< 20 Pa) à des valeurs compatibles avec un ventilateur de faible puissance (24W) et d'avoir une estimation des principales caractéristiques thermiques d'un échangeur Air-MCP comme indiqué dans le Tableau 21.

| **Caractéristiques** | **Données** | **Caractéristiques** | **Données** |
|---|---|---|---|
| Puissance fournie | 120 W | Longueur d'un caisson | 3400 mm |
| Coefficient de performance | 5 | Masse MCP d'un caisson | 130, 0677 kg |
| Température d'entrée | 25 °C | Débit d'air | 167 $m^3$/h |
| Température de sortie | 23°C | Consommation d'électricité | 24 W |
| Durée d'utilisation | 30,108 h | Pertes de charge | 17,6 Pa |
| Taux de renouvellement d'air | 7,258306 | Nombre de caissons | 4 (en parallèle) |
| Nombre de tubes dans la largeur/caisson-MCP | 6 | Nombre de tubes-MCP dans la hauteur/caisson-MCP | 7 |
| Nombre de déflecteur par contenant de MCP | 8 | Espace longitudinal entre les contenants de MCP | 6 |
| Distance entre les colonnes de tubes contenant de MCP | 25 | Nombre de tube de fixation par colonne de contenant de MCP | 6 |
| Nombre de maintient en position des contenants MCP | 2 | | |

*Tableau 21 : Principales caractéristiques thermiques et dimensionnelles du système implanté dans la maison Napévomo (4 caissons MCP)*

Dans le paragraphe suivant, nous allons vous présenter le processus que nous avons entrepris pour fabriquer un échangeur air-MCP de notre système à partir des caractéristiques obtenues dans ce paragraphe.

## VI – Réalisation d'un échangeur Air-MCP

L'objectif de ce chapitre est de présenter la fabrication de l'échangeur Air-MCP de la maison Napévomo. Cette présentation se fait en trois étapes. Dans un premier temps, nous vous présentons les solutions technologiques que nous avons retenues pour la fabrication de l'échangeur Air-MCP. Ensuite, nous présentons les différentes étapes de la fabrication à l'échelle 1 du système. La dernière partie du chapitre est consacré à la présentation de la première installation du système dans la maison Napévomo.

### *VI.1– Les solutions technologiques de l'échangeur Air-MCP*

La recherche de solutions technologiques est une phase très importante lors de la fabrication d'un équipement car elle engage jusqu'à 70% des futurs coûts du cycle de vie de l'équipement. Cette phase comporte donc des risques importants surtout lorsque la fabrication se fait à l'échelle 1, sans fabrication préalable d'un prototype qui aurait permis de vérifier en amont un certain nombre de solutions technologiques.

Plusieurs méthodes sont utilisées pour avoir des meilleurs résultats. Nous avons opté pour la méthode brainstorming qui permet de rechercher en groupe et en toute liberté un maximum d'idées sur un sujet donné et d'inventorier les solutions par la suppression d'autocensures.

A cet effet, après plusieurs séances de travail avec le personnel de l'atelier Arts et Métiers ParisTech (campus de Bordeaux Talence) et le Cahier des Charges obtenu dans les paragraphes précédents, nous avons estimé que les solutions technologiques retenues pour l'échangeur devaient faciliter la fabrication des contenants des MCP ainsi que des systèmes de remplissage, de vidange et de dilatation des MCP (découpes, soudures, emboutissage, assemblage des différentes pièces et déplacement des différents éléments de l'échangeur).

Le système est composé de trois sous ensembles comme indiqué dans la Figure 53:

- sous ensemble d'éléments qui permettent d'installer les caissons-MCP ;

- sous ensemble de composants qui permettent le remplissage, la dilatation et la disposition des MCP dans le système ;
- sous ensemble du circuit aéraulique qui permet à l'air de circuler dans le système et dans la maison.

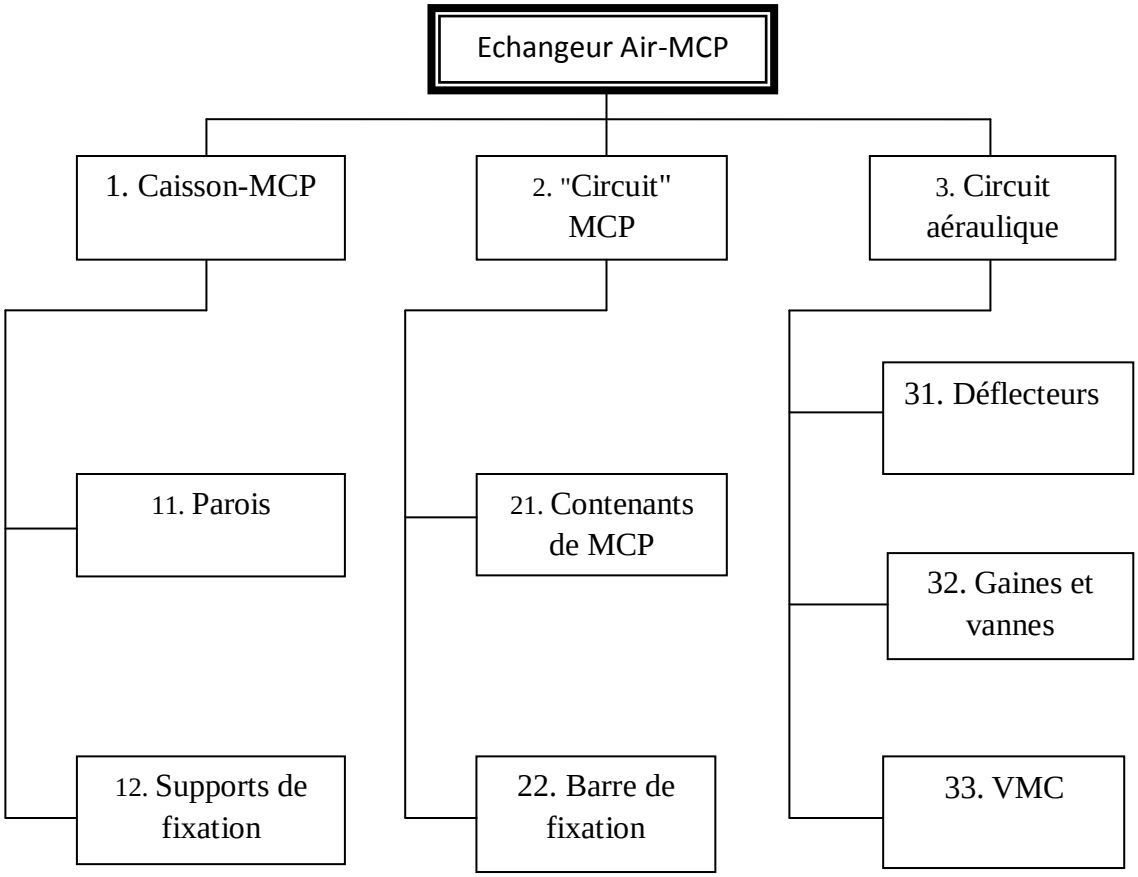



*Figure 53 : Diagramme des sous ensembles de l'échangeur Air-MCP*

### VI.1.1 – Le sous ensemble caisson-MCP

Ce sous-ensemble est composé de :

- quatre parois en bois de pin d'une épaisseur de 8 mm. Deux parois de 340 mm x 3412 mm et deux parois de 440 mm x 3412 mm.

- deux plaques de fermeture de 395 mm x 310 mm. Les deux plaques ont une ouverture circulaire de diamètre 200 mm qui permettent de fixer les gaines du circuit aéraulique (Figure 54) ;



*Figure 54 : Plaque de fermeture d'un caisson-MCP*

- deux sabots en bois de 540 mm x 340 mm qui permettent de positionner le réseau de tubes contenant les MCP, lui-même assemblé (cf. § VI.1.2).

Toutes ces pièces sont fabriquées par les Menuiseries Goisnard Frères (Belin-Beliet, 33).

Le Tableau 22 représente les caractéristiques des différents éléments du coffret de l'échangeur Air-MCP.

| Eléments | | Pièces | Réf | Qttés | Mat | Dim (mm) |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Coffret | Parois | Paroi latérale droite | 111 | 1 | Bois | 340 x 3412 épaisseur de 8 |
| | | Paroi latérale gauche | 112 | 1 | Bois | 340 x 3412 épaisseur de 8 |
| | | Paroi de dessous | 113 | 1 | Bois | 440 x 3412 épaisseur de 8 |
| | | paroi de fermeture | 114 | 1 | Bois | 440 x 3412 épaisseur de 8 |
| | Plaques de fermeture | Plaque avant | 121 | 1 | Bois | 395 x 310 et un trou de Ø 200 |
| | | Plaque arrière | 122 | 1 | Bois | 395 x 310 et un trou de Ø 200 |
| | Système de positionnement du circuit de MCP | Support de fixation | 123 | 2 | Bois | 440 x 340 épaisseur de 8 |
| | | Sabots de fixation | 124 | 2 | Bois | 540 x 340 épaisseur de 8 |

*Tableau 22 : Désignation des différents éléments du sous ensemble coffret*

### VI.1.2 – Le sous-ensemble circuit MCP

Il est composé :

- des contenants de MCP : ce sont des tubes rectangulaires horizontaux (Figure 55) de section 30 mm x 40 mm avec une longueur 3412 mm et une épaisseur de 2 mm. Dans l'échangeur, nous avons sept colonnes de six tubes soit quarante deux tubes par caisson. Les tubes en aluminium sont du type 6060 T5. Ces tubes sont fermés d'un côté des plaques taraudées (figure 56) qui permet de fixer un raccord tectite sur lequel on fixe le dispositif de remplissage de MCP.

-

- De l'autre côté, ces tubes sont fermés par une plaque taraudée pour faciliter la sortie de l'air lors du remplissage des tubes ;

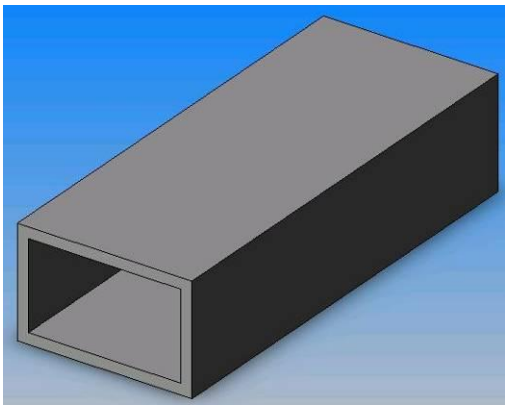


*Figure 55 : Tubes découpées des contenants de MCP*

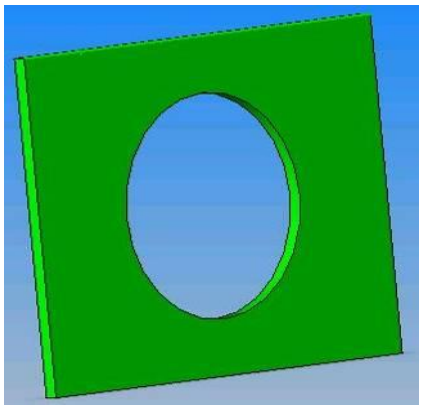


*Figure 56 : plaques taraudées soudées sur les tubes*

- des déflecteurs : ces derniers sont en plaques rectangulaires de section 40 mm x 10 mm avec une épaisseur de 2 mm, pliées en « L» (Figure 57). Ils sont fixés sur les contenants de MCP. Il y a six déflecteurs pour chaque contenant de MCP. Les déflecteurs jouent un rôle de chicane afin d'imposer à l'air un parcours tortueux et augmenter l'échange thermique air-contenant de MCP. ils vont donc partie du circuit aéraulique, mais sont présentés ici par soucis de simplification ;

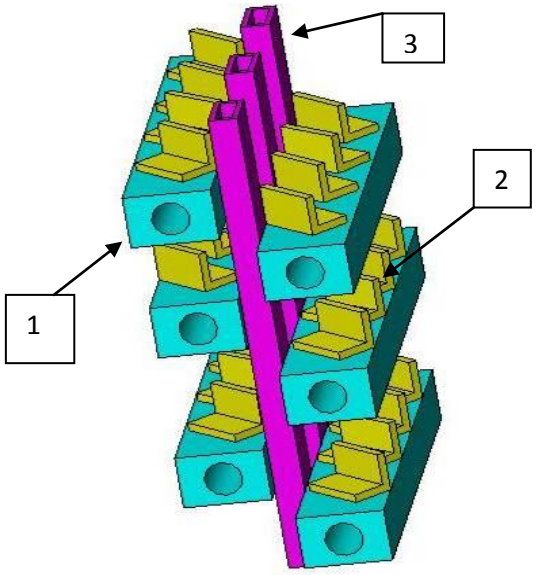



*Figure 57 : Colonne de contenants de MCP de l'échangeur du système. (1) contenant de MCP, (2) déflecteur, (3) tube de fixation*

- les tubes de fixation des contenants de MCP : ce sont des tubes en aluminium de section 20 mm x 10 mm, d'une épaisseur de 2 mm avec une longueur de 390 mm. il y a quarante deux tubes par échngeur. ils permettent de positionner les contenants de MCP en quiconque pour avoir des colonnes de contenants de MCP (Figure 57) en parallèle.

-des pièces de maintien en position des contenants de MCP : ce sont des plaques de tôle 300 mm x 75 mm, d'une épaisseur de 2 mm. Elles ont des encoches dans lequel on positionne les contenants de MCP. Elles sont pliées en U. Il y a huit pièces de maintien pour le système (Figure 58) ;

-un dispositif qui permet le remplissage et la vidange des MCP des contenants de MCP : c'est un assemblage de cent vingt petits tubes en cuivre de Ø 6 mm. Ces derniers sont fixés sur trente coudes et cinquante raccords en T pour former le dispositif. Ce dispositif permet aussi la dilatation des MCP lors du changement de phase sans apparition de contraintes sur les autres éléments de l'échangeur : en effet il possède 2 cheminées (en haut à droite et en haut à gauche sur la Figure 59).

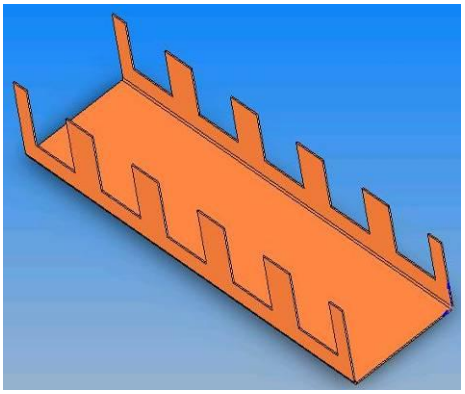


*Figure 58 : Pièce de maintient des contenants de MCP*

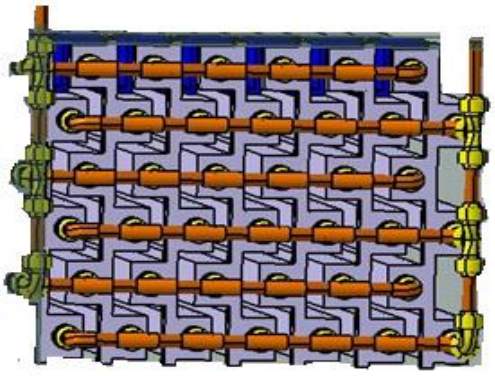


*Figure 59 : Système de remplissage des MCP dans l'échangeur Air-MCP*

En conclusion, nous avons dans chaque échangeur (Figure 60) quarante deux contenants de MCP.

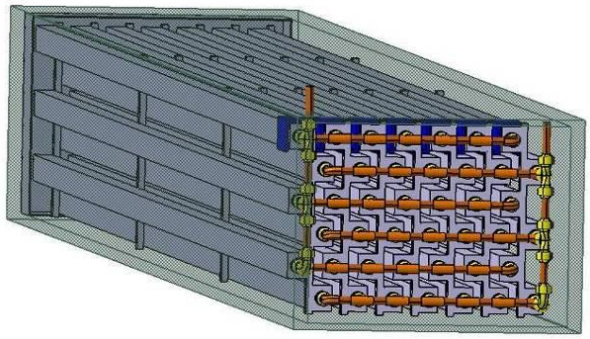


*Figure 60 : échangeur MCP positionné dans un coffret*

Ils sont fixés en quinconces sur vingt quatre tubes de fixation pour former sept colonnes de six contenants de MCP. Deux cent cinquante déflecteurs sont fixés sur les contenants de MCP.

Les différentes caractéristiques des éléments du sous-ensemble circuit MCP sont dans la nomenclature du Tableau 23.

| **Eléments** | | **Pièces** | **Réf** | **Qtités** | **Mat** | **Dim (mm)** |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Circuit de MCP | Contenants de MCP | Tube contenant des MCP | 211 | 42 | Aluminium | 40 x 20 x 2<br>L = 3412 |
| | | Tube de fixation | 212 | 24 | Aluminium | 20 x 10 x 2<br>L = 390 |
| | | Plaque arrière taraudées | 221 | 42 | Aluminium | 40 x 20 x 2 |
| | | Plaque avant taraudées | 222 | 42 | Aluminium | 40 x 20 x 2 |
| | Pièce de maintien en position | | 231 | 4 | Aluminium | 40 x 10 x 2 |
| | Dispositif de remplissage, de vidange et de dilatation des contenants de MCP | Tube de fixation | 232 | 42 | Cuivre | L = 5 m, Ø 12 |
| | | Tube d'assemblage | 233 | 30 | Cuivre | 10 x 12 |
| | | Coude | 234 | 22 | Cuivre | 90° Femelle Ø 12 |
| | | Raccord en Té | 235 | 20 | Cuivre | |
| | | Tectite | 236 | 42 | Cuivre | / |

*Tableau 23 : Désignation des différents éléments du sous ensemble circuit MCP*

### VI.1.3 – Le sous ensemble circuit aéraulique

Nous vous présentons deux circuits aérauliques : circuit aéraulique pour un échangeur Air-MCP et le circuit aéraulique pour le système que nous avons conçu pour la maison Napévomo.

Sous-ensemble aéraulique pour un échangeur

Il est composé de :

- Gaines permettant à l'air de circuler entre la VMC et l'échangeur qui se trouve dans le coffret ;
- Une VMC (Ventilation Mécanique Contrôlée) qui permet de produire le flux forcé en fonction du besoin.

Sous-ensemble aéraulique pour la maison Napévomo

Il est composé :

- Des gaines qui permettent la circulation de l'air dans le circuit aéraulique de la maison ;
- Des vannes d'équilibrage que l'on rajoute dans les gaines traditionnelles pour repartir équitablement les flux d'air entre les 4 caissons-MCP;
- Des registres à iris galvanisés qui permettent d'orienter la circulation de l'air en fonction du mode de fonctionnement (diurne ou régénération des MCP) ;
- Une VMC (Ventilation Mécanique Contrôlée) qui permet de produire le flux forcé en fonction du besoin**.**

Les caractéristiques de ses matériaux se trouvent dans le Tableau 24.

| Eléments | | Pièces | Réf | Qtités | | Mat | Dim (mm) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | a* | b* | | |
| Circuit aéraulique | Déflecteurs | Déflecteurs de bord | 223 | 84 | 326 | Aluminium | 40 x 10 x 2 |
| | | Déflecteurs du milieu | 224 | 84 | 326 | Aluminium | 40 x 10 x 2 |
| | Gaines | Collection | 311 | 1 | 4 | Galva | Ø 200 |
| | | Refoulement | 312 | 1 | 4 | Galva | Ø 200 |
| | | Circulaire | 313 | 0 | 4 | Galva | Ø 200 |
| | | Raccord | 314 | 2 | | Galva | Ø 200 |
| | Vanne | Vanne | 321 | 0 | 8 | Galva | Ø 200 |
| | Registre | Registre à iris | 322 | 0 | 4 | Galva | / |
| | VMC | VMC | 323 | 1 | | / | / |

*Tableau 24 : Désignation des différents éléments du circuit aéraulique. (a*) pour un échangeur (b*) pour 4 échangeurs intégrés dans la maison Napévomo*

La fabrication du plancher et le positionnement du local technique dans la maison imposent un entraxe inférieur ou égal à 4400 mm. Cet entraxe se décompose de la manière suivante (Figure 61) :

- 125 mm de rayon de gaine de collection (A-B) ;

- 35 mm de gaine de raccord (B-C) ;

- 294 mm de gaine de raccord du ventilateur de la VMC (C-D) ;

- 200 mm de chambre d'admission (D-E) ;

- 3412 mm caisson-MCP (E-F)

- 100 mm de chambre de refoulement (F-G)

- 35 mm de gaine de raccord (G-H)

- 125 mm de rayon de gaine de refoulement (H-I)

Soit un total de : 125 + 35 + 294 + 200 + 3412 + 100 + 35 + 125 = 4326 mm

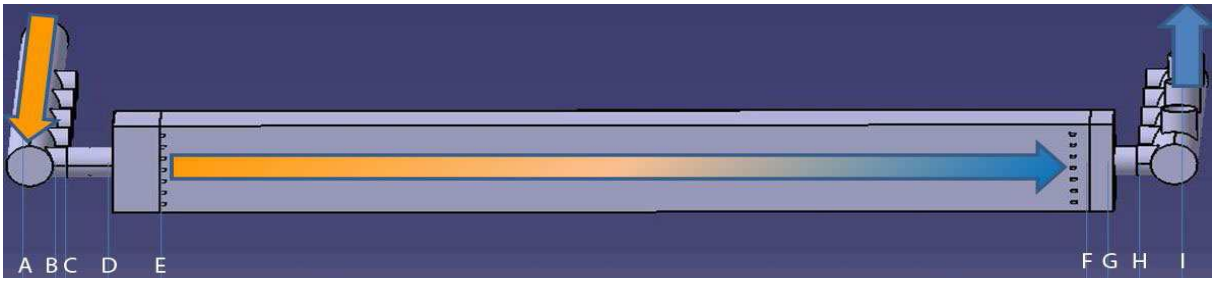



*Figure 61 : Schéma de principe d'aboutage des différents éléments qui composent le contenant de MCP et le sens de la circulation d'air*

## *VI.2 – Le synopsis de fabrication et de montage de l'échangeur Air-MCP*

Dans ce sous paragraphe, nous présentons les différentes opérations de fabrication et de montage de l'échangeur Air-MCP. Elles se déroulent en quatre étapes :

1. Fabrication des différentes pièces du système avec des tests d'étanchéité des pièces soudées ;
2. Assemblage des contenants des MCP, des colonnes de contenants MCP et du système de remplissage, de vidange et dilatation des MCP. Tests d'étanchéité des différents assemblages ;
3. Préparation des produits (MCP+dopeur de la conductivité des MCP), puis remplissage de ses produits dans les contenants (tubes) et test d'étanchéité.

### VI.2.1 – Fabrication des pièces d'un échangeur Air-MCP

La fabrication des pièces d'un échangeur Air-MCP se fait en trois phases : nous fabriquons d'abord les contenants de MCP, ensuite nous fabriquons des déflecteurs des contenants MCP par la suite nous fabriquons le dispositif de remplissage, de vidange et de dilatation des contenants de MCP.

### VI.2.1.1 – Fabrication des contenants de MCP

La fabrication des contenants de MCP inventoriés dans le Tableau 23 (paragraphe VI.1.2) se fait en trois étapes. Dans un premier temps, nous découpons les tubes de 40 mm x 30 mm x 2 mm à une longueur de 3412 mm (Figure 62) ou nous assemblons par soudure de chutes de découpe de tubes (Figure 63) afin de réduire le taux de rebus.



*Figure 62 : Tubes découpés*

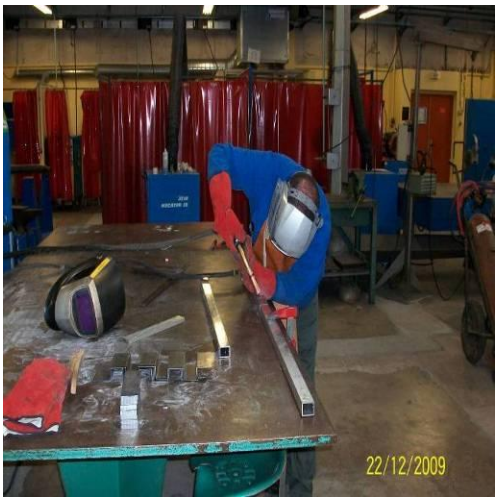



*Figure 63 : Assemblage des chutes de tubes par soudure*

Ensuite, nous découpons et perçons les plaques (Figure 64) avant et arrière des contenants de MCP. Ensuite nous les taraudons.

Nous ébavurons toutes les pièces fabriqués afin d'éviter les accidents (blessures aux mains ou aux pieds) lors des séances de travail (Figure 65).



*Figure 64 : Plaques avant et arrière taraudées*




*Figure 65 : Ebavurage des soudures par abrasion*

Nous soudons les plaques avant et arrière sur les tubes découpés ou sur les bouts de tubes soudés pour obtenir les contenants de MCP (Figure 66 et Figure 67).



*Figure 66 : Plaques arrières soudés les tubes découpés ou assemblés*



*Figure 67 : Plaques avant taraudées et soudées sur les tubés découpés ou assemblés*

Par la suite, nous découpons les tubes de 30 mm x 20 mm x 2 mm à une longueur de 390 mm pour avoir les tubes de fixation.

L'avant dernière phase de cette partie de la fabrication des contenants de MCP, consiste dans un premier temps à installer les raccords tectite qui nous permet de fixer le dispositif de dilatation et remplissage des MCP. Cette tâche consiste, après avoir mis la colle sur les raccords tectites, de les viser rapidement sur les contenants de MCP afin d'éviter les fuites (Figure 68). La Figure 69 vous présente un ensemble de contenants de MCP prêt pour la suite du montage.



*Figure 68 : Fixation des raccordes tectites*



*Figure 69 : Amas de tubes avec les raccords tectites*

Ensuite, six contenants de MCP sont soudés sur quatre tubes de fixation pour avoir une colonne de contenants de MCP (Figure 70 et Figure 71). Les contenants de MCP sont soudés en quinconce pour que l'air puisse circuler sur toutes les faces de tous les tubes. Cette solution nous permet de maximiser l'échange thermique entre l'air et les tubes.



*Figure 70 : Réglage du montage d'une colonne des contenants des MCP*

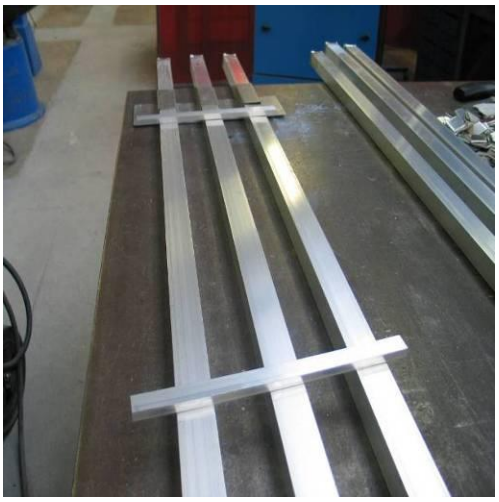


*Figure 71 : Disposition des tubes de fixation pour le montage d'une colonne de contenants de MCP*

La dernière phase de cette partie de la fabrication consiste à tester l'étanchéité de toutes les parties soudées de chaque colonne de contenants de MCP. Cette opération consiste à verser de l'eau dans les tubes (Figure 72). Ensuite on injecte de l'air comprimé (Figure 73) pour voir s'il y a des fuites.



*Figure 72 : Remplissage d'eau dans les tubes*



*Figure 73 : Injection d'air comprimé dans les tubes*

### VI.2.1.2 – Fabrication des déflecteurs

Pour améliorer l'échange thermique entre l'air et les tubes, nous avons estimé qu'il fallait imposer à l'air un circuit tortueux (le dimensionnement ayant été réalisé sans cette tortuosité). Cette solution technologique permettrait à l'air d'être non seulement en contact un peu plus longtemps avec les tubes mais aussi de circuler entre différents surfaces de tube tout au long de son trajet dans le caisson.

A cet effet, nous avons conçu et fabriqué des déflecteurs. Ce sont des pièces en forme de « L ». Leur fabrication consiste à découper des tôles rectangulaires et à les plier Figure 74. Ensuite ces derniers sont fixés au bout et au milieu des contenants MCP comme l'indique la Figure 75.



*Figure 74 : Fabrication des déflecteurs*



*Figure 75 : Fixation des déflecteurs aux milieux des tubes*

### VI.2.1.3 – Fabrication du dispositif de remplissage, de vidange et de dilatation des contenants MCP

Le système de remplissage, de vidange et de dilatation MCP de l'échangeur Air-MCP est composé d'un ensemble de petits tubes en cuivre reliés entre eux par des raccords en forme de Té et des coudes. La fabrication de ce dernier consiste, dans un premier temps à découper des morceaux de tubes en cuivre de fixation et d'assemblage (Figure 76). Ensuite ces derniers sont soudés sur des raccords en Té et

les coudes pour former le système de remplissage, de vidange et de dilatation MCP de l'échangeur (Figure 77).



*Figure 76 : Tubes en cuivre de fixation et d'assemblage découpés*

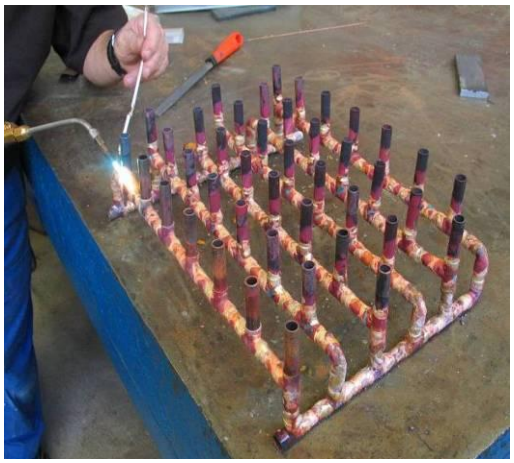
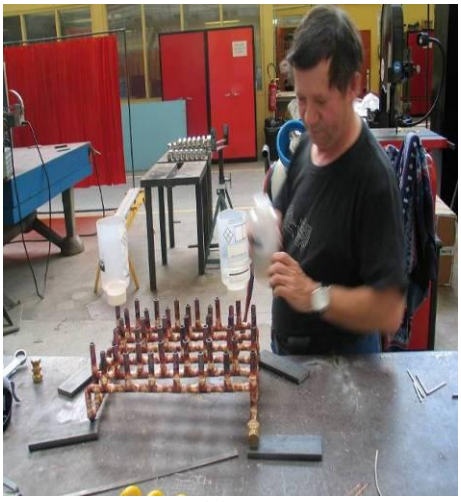


*Figure 77 : Soudage des tubes de fixation et d'assemblage sur les raccords en Té et les coudes*

Par la suite, nous testons l'étanchéité du dispositif de remplissage, de dilatation et de vidange des contenants MCP. Comme le dispositif des contenants des MCP, celui-ci ne doit pas avoir de fuites sinon nous risquerons de perdre du produit lors du remplissage ou de la vidange et même de la dilatation des MCP.

Les tests d'étanchéité du dispositif de remplissage, de dilatation et de vidange des contenants MCP consistent à remplir ce dernier avec de l'eau (Figure 78a).



(a)



(b)

*Figure 78: Test d'étanchéité du dispositif de remplissage, de vidange et de dilatation (a) phase de remplissage d'eau par gravité dans le dispositif (b) phase de 24 h d'attente (estimation des fuites)*

Ensuite laisser l'eau dans le dispositif pendant 24 h (Figure 78b). S'il y a des fuites on ressoud les parties où il y a les fuites. On arrête les tests lorsqu'il y a plus de fuites.

Remarques sur l'importance des tests d'étanchéité

Les tests d'étanchéité sont très importants. Il faut les faire tout au long de la fabrication et du montage de l'échangeur. C'est grâce à ces derniers que nous avons pu adapter notre solution technique en ce qui concerne le système de remplissage.

En effet, la première solution pour le remplissage des tubes consistait à faire des trous oblongs en bout des tubes (Figure 79) et le remplissage se ferait par vase communicant à l'aide des petits tubes soudés (cheminée de remplissage) à cet endroit des tubes (Figure 80).



*Figure 79 : Trou oblong pour la première solution de remplissage*



*Figure 80 : Assemblage des tubes pour le remplissage de la première solution de remplissage*

Au cours des tests d'étanchéité, nous avons révélé plusieurs zones de fuites au niveau des soudures entre les cheminées de remplissage et les éléments de stockage d'énergie. Il y avait des fuites à cet endroit parce que les surfaces perpendiculaires n'assuraient pas toujours l'étanchéité aux extrémités des cordons de soudure.

En conséquence, nous avons opté pour que le remplissage se fasse en bout de tube pour éviter des soudures perpendiculaires. Pour conserver le principe de communication entre les éléments de stockage d'énergie, nous avons remplacé les petits tubes de remplissage par les raccords tectites en bout de tubes. Ces derniers nous permettent de fixer le dispositif de remplissage et de vidange en bout d'un amas de tubes et d'éviter les fuites sur cette partie du système (Figure 81).

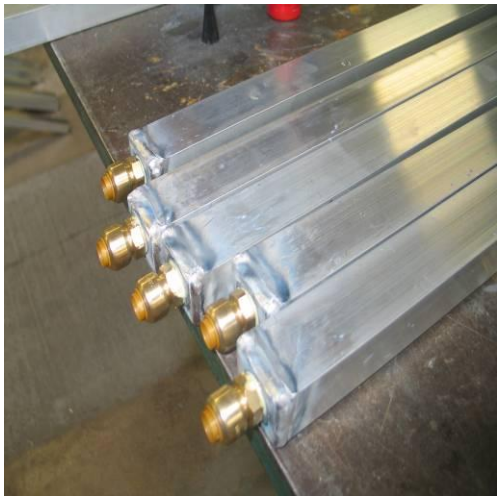


*Figure 81 : Solution de remplissage de MCP retenue (raccords tectites en extrémité)*

### VI.2.2 – Assemblage des contenants de MCP, des colonnes de contenants de MCP et du dispositif de remplissage, de vidange et de dilatation des contenants MCP

Cette phase consiste à assembler les colonnes des contenants MCP et le dispositif de remplissage, de dilatation et de vidange des contenants MCP. Toutes les sept colonnes de contenants MCP sont assemblées au fur et à mesure sur le dispositif de remplissage, de dilatation et de vidange (Figure 82).

Pour chaque fixation d'une colonne de contenant MCP sur le dispositif de remplissage, de vidange et de dilatation, il faut s'assurer que ce dernier est bien stabilisé et bien aligner par rapport aux autres colonnes (Figure 83).

Ensuite nous fabriquons des pièces de maintien des contenants MCP. Ces pièces permettent d'assurer une distance contrôlée entre les colonnes de tubes contenant les MCP.



*Figure 82 : Montage de la première rangée de contenant MCP sur le dispositif de remplissage, de dilatation et de vidange des contenants MCP*



*Figure 83 : Réglage de la dernière colonne de contenant MCP sur le dispositif de remplissage, de dilatation et de vidange des contenants MCP.*

**Pièces des maintiens des contenants MCP**

Ce sont des tôles en U avec des entailles de chaque côté (Figure 84). Elles se montent par paires. Le montage consiste à positionner un élément de la paire au dessus des tubes et un autre au dessous des tubes. La paire est maintenue dans sa position à l'aide de deux tiges filetées. Les tiges filetées sont visés de chaque côté de cette pièce (Figure 85).

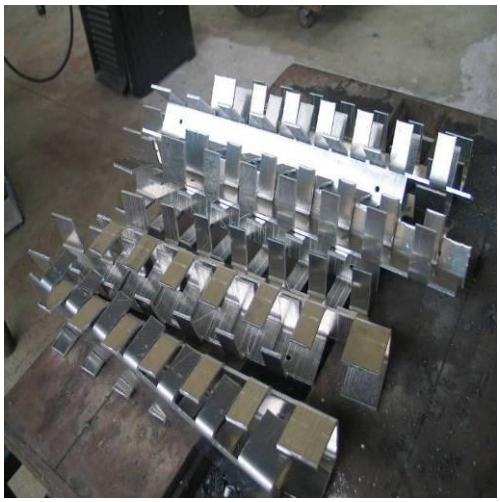


*Figure 84 : Pièces de maintien des contenants MCP*



*Figure 85 : Montage de la pièce de maintien des contenants MCP*

Les Figure 86 et Figure 87 présentent un échangeur assemblé en vue de face et vue en arrière prêt pour l'étape de montage suivant.



*Figure 86 : vue de face d'un échangeur*



*Figure 87 : vue arrière d'un échangeur*

La dernière partie de cette phase consiste à tester les fuites sur le montage des tubes contenant les MCP et le système de remplissage, de vidange et de dilatation. Comme les autres tests, ces tests d'étanchéité sont très importants; ils permettent de s'assurer que l'assemblage des différentes pièces s'est bien déroulé, qu'il n'y a aucune fuite sur tous les montages et que l'échangeur pourra fonctionner comme nous l'avons prévu.

Cette phase se déroule en trois étapes, dans un premier temps nous vérifions si les assemblages de chaque contenant de MCP et le système de remplissage, dilatation et de dilatation est bien fait. Ensuite nous testons l'étanchéité des différents échangeurs.

Les tests d'étanchéité consistent à remplir de l'eau dans l'échangeur (Figure 88). Ensuite de laisser cette eau pendant plusieurs heures (Figure 89) dans l'échangeur. Lorsqu'on perçoit les fuites (en général dans les parties soudées), ces derniers sont ressoudés ou bouchés avec une colle spéciale.



*Figure 88 : Remplissage d'eau des échangeurs pour les tests d'étanchéité*



*Figure 89 : phase de 2 h d'attente pour tester l'étanchéité*

### VI. 2.3 – Montage des échangeurs et tests

Le montage des échangeurs consiste à installer ces derniers dans les caisson-MCP. L'opération consiste à poser dans un premier temps l'échangeur au dessus du coffret à l'aide d'un palan ( Figure *90*) et de le poser sur les sabots de fixation à l'intérieur du coffret (Figure 91).



*Figure 90 : Préparatif de l'installation de l'échangeur*



*Figure 91 : Installation de l'échangeur dans le caisson*

On fixe les sabots à l'intérieur des caissons, ces derniers permettent que l'échangeur ne soit pas directement en contact avec l'intérieur du coffret. De ce fait, il y a un échange thermique entre l'air et les surfaces de l'échangeur qui se trouve en bas du coffret.

### VI.2.4 – Remplissage des produits dans les coffrets et intégration du système dans la maison

Cette phase consiste à vous présenter l'expérimentation que nous avons réalisée pour améliorer la conductivité des MCP, à préparer les différents produits et les remplir dans les quatre coffrets.

#### VI.2.4.1 – Amélioration de la conductivité des MCP

Actuellement, les MCP ont une conductivité thermique assez faible de l'ordre de 0,2 W/m.K en moyenne ce qui ne permet pas d'avoir un bon transfert thermique. Ce phénomène est alors amplifié par l'épaisseur de la phase (solide ou liquide) à traverser car, lors du changement de phase du MCP, l'échange thermique à lieu à l'interface solide/liquide du MCP. Lorsque le front de solidification ou de fusion se déplace, il laisse derrière lui une nouvelle phase (solide ou liquide) que le flux thermique doit traverser avant d'atteindre le front en question. Plus l'épaisseur de cette phase est importante et plus la résistance thermique qu'elle engendre est grande.

Pour palier ce problème, deux solutions sont utilisées en général : faire en sorte que l'épaisseur à traverser soit la plus petite possible. Pour cela, on utilise souvent des microcapsules sphériques qui permettent aux MCP de changer facilement de phase sur l'ensemble de leur volume. L'autre solution consiste à mélanger ou à mettre au cœur du MCP un matériau ayant une bonne conductivité (graphite, maille de fer, fil de fer, etc.). Nous avons expérimenté la deuxième solution à partir de deux concepts. Dans le premier concept, nous avons mélangé le graphite et le MCP (avant remplissage des contenants MCP). Dans le deuxième concept, nous avons introduit du fil de fer au milieu des tubes dans les contenants MCP (en remplissage ceux-ci avec du MCP pur).

**a) Mélange MCP avec le graphite TIMREX BNB90**

Le graphite TIMREX BNB90 est un graphite contenant plus de 93% de graphite de 10 mg/m$^3$ de VLE et 5 mg/m3 de VLEP. Il est vendu par la société TIMCAL graphite et charbon.

Dans ces travaux de thèse, A. Zoubir (2007) atteste : la conductivité thermique effective λ des matériaux sel/SFG augmente progressivement avec la fraction volumique F et elle prend des valeurs entre 1 et 2 W/m.K pour des fractions volumiques de graphite comprises entre 0 et 0.075 et se situe dans l'intervalle 2 – 3 W/m.K pour 0.075 < F < 0.12 sur la plage de valeurs de Ø comprise entre 0.12 et 0.15, la conductivité thermique augmente significativement (presque un saut). Elle atteint des valeurs de 7-8 W/m.K sur l'intervalle 0.15 < F < 0.21.
De ce fait, nous avons décidé de commencer nos dosages de graphite à la fraction volumique de 0.15 (Figure 92 et Figure 93).



*Figure 92 : Echantillons de graphite (SFG 75) et du MCP (RT21)*

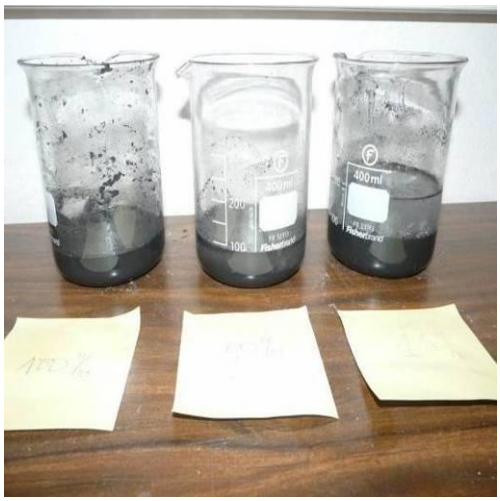


*Figure 93 : Echantillons de mélange MCP+graphite réalisés à 15%, 25% et 75% en volume de graphite*

Nous les avons mis à l'étuve à 25°C puis exposé dans la salle dont la température varie entre 1°C et 10°C à différentes durées pour suivre le comportement des produits. Il fallait qu'il y ait une homogénéisation des deux produits pour que, lors du

changement de phase, nous n'ayons pas les deux produits dissociés ce qui ne permettrait pas au graphite de jouer son rôle

Nous avons constaté que le mélange était homogène pour une fraction volumique de 0,15 quelque soit la durée de l'échantillon dans l'étuve ou à l'extérieur. C'est le dosage que nous avons retenu pour nos travaux.

Nous avons mesuré conductivité de la paraffine pure et celle contenant une fraction volumique de 0,15 de graphite TIMREX BNB 90. Les mesures ont été faites pour les phases solide et liquide. Nous avons constaté que nous avons une augmentation de la conductivité pour les deux phases, assez importante comme l'indique le Tableau 25.

| Différents phases / Différents produits | Liquide (W/m.K) | Solide (W/m.K) |
|---|---|---|
| Paraffine pure | **0.108** | **0.084** |
| Paraffine +graphite TIMREX BNB90 | **0.561** | **0.791** |

*Tableau 25 : Mesures de la paraffine pure et de la paraffine+graphite*

### *b)* Mélange MCP et le fil de fer

Pour que le fil de fer puisse améliorer la conductivité du MCP, il fallait qu'il se trouve au milieu de ce dernier dans les contenants de MCP. La principale difficulté était de trouver du fil de fer qui peut se positionner facilement au milieu d'un tube d'une longueur de 3140 mm. Nous avons choisi du fil de fer malléable de diamètre 4 mm (Figure 94). Ce dernier est soutenu dans sa position par une tige de fer de diamètre 3 mm.

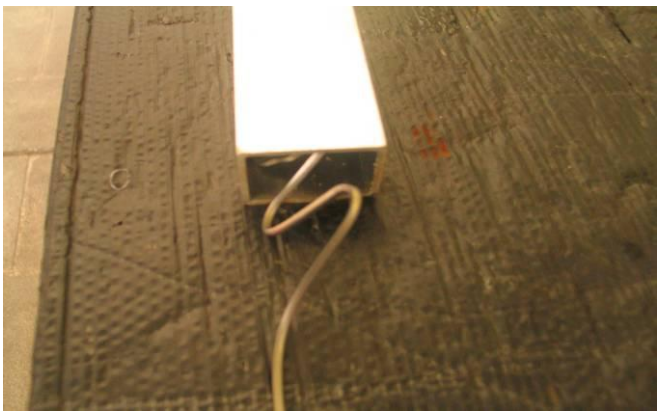


*Figure 94 : Insertion du fil de fer à l'intérieur du tube pour améliorer la conductivité du MCP*

### VI.2.4.2 – Préparation des produits et remplissage des coffrets

Chaque coffret contenait un produit différent comme indiqué dans le Tableau 26.

| N° caisson-MCP | Contenu |
|---|---|
| 1 | MCP pur (RT21) |
| 2 | MCP pur (RT21) + graphite TIMREX BNB |
| 3 | MCP pur (RT28HC) |
| 4 | MCP pur (RT28HC) + fil de fer |

*Tableau 26 : Différents produits des quatre caissons*

Pour le remplissage des deux caissons contenant les MCP pur, (caissons 1 et 3), les opérations se sont réalisées facilement. On récupère les quantités de MCP dont on a besoin (Figure 95) ensuite on les verse dans les caissons 1 et 3.

En ce qui concerne le caisson contenant le mélange MCP+ graphite. Les opérations à effectuer consistent à rassembler les quantités de MCP et de graphite nécessaire, de les mélanger (Figure 96) afin qu'il soit homogène ensuite de verser ce mélange dans le caisson 2.



*Figure 95 : récupération du MCP*



*Figure 96 : mélange de graphite+ MCP*

Pour le caisson contenant le produit MCP+fer, dans un premier temps, on introduit les fils de fer au milieu des tubes contenant les MCP. Ensuite on remplit le caisson de la quantité de MCP prévu. La principale difficulté du remplissage de ce caisson consiste à introduire du fil de fer au milieu des tubes de 3140 mm de longueur.

### VI.2.4.3 – Installation du système de rafraîchissement dans la maison Napévomo

La première installation du système de rafraîchissement dans la maison Napévomo a été réalisée sur le site du partenaire du projet (menuiserie Goisnard et Frères) à Belin Béliet (33). Ce test avait pour but dans un premier temps de s'assurer que le système intègre bien la maison comme convenu et que l'assemblage des échangeurs avec le circuit aéraulique de la maison se faisait dans les meilleures conditions.

A cet effet, nous avons installé les quatre caissons au fur et à mesure dans les compartiments prévus comme indiqué dans les Figure 97a et Figure 98b.



(a) (b)

*Figure 97 : Installation des caissons dans la maison : (a) installation du premier caisson (b) installation du deuxième caisson*

Cette opération était très délicate car il fallait éviter au maximum que les différents éléments du système soient endommagés (points d'assemblages), ceci dans le but de respecter le calendrier du déroulement du projet Napévomo et les dates du concours Solar Décathlon Europe (SDE) 2010.

Après l'installation des quatre caissons, nous avons installé les circuits aérauliques en aval (Figure 98) et amont (Figure 99).



*Figure 98 : vue de l'assemblage du circuit aéraulique aval*



*Figure 99 : vue de l'assemblage du circuit hydraulique amont*

Un système de gestion de fonctionnement automatique de ce réseau de 4 échangeurs MCP a été expérimenté. Il permet lors du rafraîchissement de la maison, de fermer les circuits d'air lorsque la température de l'air sortant de l'échangeur est la même que celle de la maison (les MCP sont alors entièrement fondus). De même, lors du fonctionnement nocturne (solidification des MCP) dès que les MCP sont solidifiés (c'est-à-dire lorsque les températures d'entrée et de sortie d'air des échangeurs sont identiques), il ferme le circuit d'air qui permet la solidification des MCP. Il garde en même temps ouvert le circuit d'air qui permettait de rafraîchir directement la maison pendant la nuit si nécessaire.

### *VI.3 – Conclusion*

Dans ce paragraphe, nous avons présenté les différentes étapes de la fabrication des échangeurs du système. Cette phase a été la partie la plus pratique au cours de nos travaux de thèse. Elle s'est faite en quatre grandes étapes : inventaire de toutes les pièces contenues dans le système de rafraîchissement MCP, fabrication des différentes pièces du système, tests des différents montages du système et remplissage des quatre caissons et première installation du système dans la maison Napévomo.

La fabrication des différentes pièces a été longue et délicat. Il fallait couper et assembler cent soixante huit tubes pour les contenants des MCP. Ensuite il fallait percer et tarauder cent cinquante six plaques manuellement pour avoir un meilleur filetage possible. Ensuite, on venait souder ces derniers sur les tubes découpés. De même, il fallait couper et assembler deux cents dix petits tubes en cuivre pour réaliser le circuit de remplissage, vidange et de dilatation.

Les tests d'étanchéité sont aussi une étape importante pour le système de contenants de MCP et celui de remplissage, vidange et dilatation. Il ne fallait pas qu'il y est des fuites dans les différents compartiments sinon il fallait ressouder ou recoller les parties où il y avait les fuites. Pour les parties assemblées, il fallait reprendre le montage pour l'assemblage des différents compartiments quand il y avait des fuites.

Le remplissage des différents produits dans les coffrets a été aussi délicat notamment les coffrets contenant les produits MCP+graphite et MCP+fil de fer. Pour le premier, il fallait d'abord s'assurer que le mélange soit homogène et stable au cours des cycles fonte/solidification et pouvoir le remplir convenablement. Pour le deuxième, il fallait installer le fil de fer au milieu d'un tube de 3412 mm.

Dans le paragraphe suivant nous présentons les premiers résultats des essais en laboratoire, et in situ en situation de concours SDE 2010 du système de rafraîchissement mis en place.

## VII – Essais et validation des premiers résultats

Dans ce chapitre, nous vous présentons le dispositif expérimental de laboratoire que nous avons mis en place pour réaliser les essais. Par la suite, nous vous présentons les essais issus de ce dispositif expérimental, puis les essais in situ (à Madrid en juin 2010).

### *VII.1 – Description du dispositif expérimental*

L'ensemble du dispositif expérimental (Figure 100) mis en œuvre au cours de cette thèse est composé : (A) d'un espace qui permet d'avoir un panel des différentes températures dont on a besoin pour les essais, (B) un ventilateur qui permet d'imposer un débit d'air, (C) un caisson-MCP instrumenté et un système d'acquisition des mesures pour une expérience complète de fonctionnement normal du dispositif expérimental. Le caisson-MCP est installé dans une salle de manipulation (D).

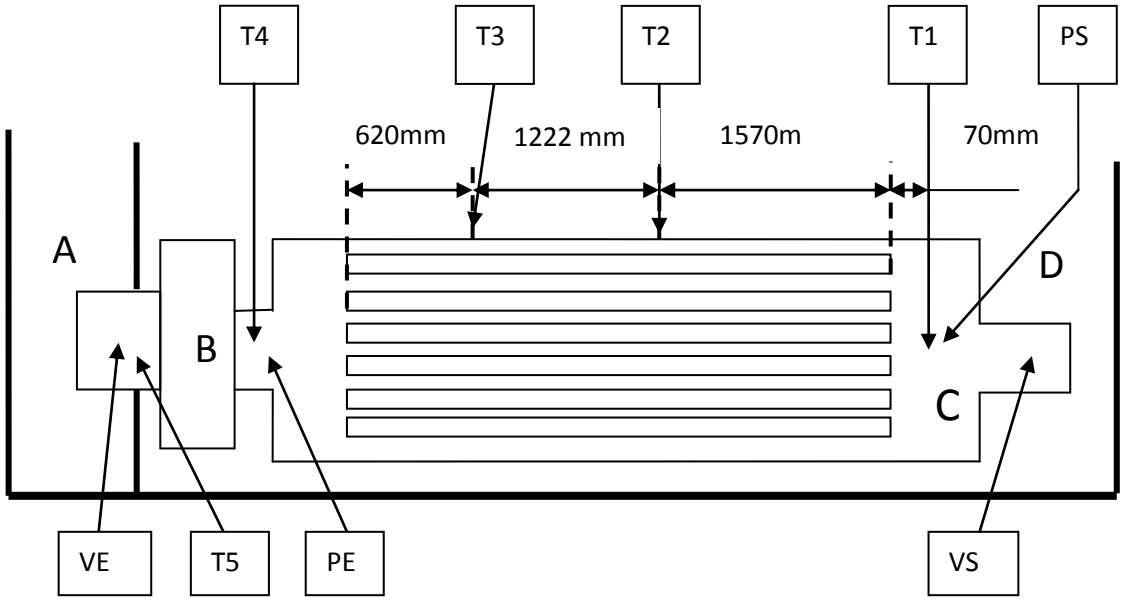



*Figure 100 : Schéma du dispositif expérimental*

A – zone de mise en température

B – ventilateur

Ti (i=1,…,5) – thermocouples

VS – vitesse de sorti de l'air

PS – pression de sortie

C – système expérimental

D – salle de manipulation

VE – vitesse d'entrée de l'air

PE – Pression d'entrée

*zone de mise en température (espace A) :

Nous avons réalisé les essais durant la période des fêtes de fin d'année (décembre 2010). A cette époque (hiver), les conditions de climatiques ne nous permettaient pas d'avoir les différentes températures d'air souhaitées en amont pour nos travaux. Nous étions contraints de créer un espace qui nous permettait d'avoir les températures d'air dont nous avions besoin pour les différentes expérimentations. Nous avons donc installés dans une salle (Figure 101) des radiateurs pour chauffer la salle afin d'avoir les températures dont nous avions besoin. Nous avons pu obtenir des températures allant de 15°C à 45°C environ.




*Figure 101 : Espace (salle A) où est effectuée la mise en température. (1) gaine d'entre d'air de la salle A à la salle D, (2) radiateurs qui permettent de chauffer la salle A.*

La procédure pour obtenir la température voulue consiste à chauffer l'espace A lorsqu'on avait besoin des températures supérieures à 28°C (température de fusion du MCP utilisé dans les essais). Ensuite on fait circuler cet air chaud dans le caisson-MCP. De même lorsqu'on a besoin des températures inférieures à 28 °C, on arrête les radiateurs et on ouvre les ouvertures de la salle A. Ensuite on fait circuler l'air frais dans le caisson pour démarrer la solidification des MCP.

On peut ainsi effectuer des cycles de fonte/consolidation des MCP.

*Système expérimental

Le système expérimental est composé de :

- Un circuit aéraulique (Figure 102) qui permet de faire circuler l'air dans le caisson entre la salle de mise en température et le caisson-MCP. Il est composé de gaines de diamètre de 200 mm qui relie les différents composants du système expérimental. Un ventilateur de marque 'ruck RS 160L, 104202' (Figure 102). Il est installé à l'entrée du caisson. Il est branché à un variateur de tension qui nous permet de varier la vitesse de ce ventilateur. Il nous a été fourni par la société Aldès.
- Un caisson-MCP est en bois de pin maritime de section 440 mm x 340 mm x 4 mm ayant une longueur de 3440 mm. Il contient quarante deux tubes en aluminium. Chaque tube à une section de 40 mm x 30 mm x 2 mm pour une longueur de 3412 mm (Figure 103). Dans chaque tube, il y a 2,032 kg de MCP soit 130,06 kg de MCP dans le caisson-MCP. Le MCP utilisé est le RT28 HC. Il est fournit par le fabricant Rubitherm ®.



*Figure 102 : Circuit aéraulique du dispositif expérimental (ventilateur+gaines)*



*Figure 103 : Caisson-MCP du dispositif expérimental avec les différents thermocouples*

- Un module d'acquisition composé de :

* Thermocouples de type K vendu par RS components. Ils ont été installés dans différents endroits notamment (Figure 103 et Figure 104) : un thermocouple (T5) installé en amont du ventilateur et un autre thermocouple (T4) en aval du ventilateur.

Ces deux thermocouples permettent de suivre l'évolution de la température en entrée et en sortie du ventilateur ; trois thermocouples sont installés le long du caisson-MCP pour suivre l'évolution de la température de l'air au sein du caisson-MCP. Il y a un thermocouple installé à l'entrée du caisson-MCP (T3), un thermocouple installé au milieu du caisson-MCP (T2) et un dernier thermocouple installé à la fin du caisson-MCP (T1). Ces trois thermocouples sont fixés au milieu du caisson-MCP entre les tubes contenant les MCP.

* Enregistreur de données TC-08 USB et le logiciel d'acquisition de données picolog ADC 10 du fabricant Pico Technology permettent de récolter les valeurs des différents thermocouples installés (Figure 104) sur le dispositif expérimental ;



*Figure 104 : Acquisition de données du dispositif expérimental*

* Fil chaud du coffret KIMO AMI 300 qui permet de mesurer les vitesses d'air en entrée (VE) et les vitesses d'air en sortie (VS) ;

* Un appareil multifonction du coffret KIMO AMI 300 qui permet de mesurer les pertes de charge entre l'entrée du caisson (PE) et la sortie du caisson (PS).

Salle de manipulation

La salle de manipulation est une salle (espace D) de grand volume (>150 $m^3$). C'est à l'intérieur de cette salle que nous avons installé le caisson-MCP.

## *VII.2 – Analyse des premiers résultats du dispositif expérimental*

L'objectif de cette première campagne de mesure était de suivre l'évolution des températures d'air dans la durée et dans l'espace, au cours d'une solidification ou d'une fusion des MCP. Cette évolution dépend entre autre de la vitesse de l'air et de la température de l'air amont. Les pertes de charge dans le circuit sont aussi mesurées.

Le principe de fonctionnement du dispositif expérimental est le suivant :

Fusion des MCP : on chauffe la zone A à l'aide des radiateurs jusqu'à ce que sa température soit supérieure à la température de fusion du MCP c'est-à-dire 28°C. Ensuite on fait circuler cet air chaud dans le caisson à l'aide du ventilateur ; cet air est rejeté dans la zone D.

Solidification des MCP : on arrête les radiateurs et on aère la zone A jusqu'à ce que la température soit inférieure à 28°C. Ensuite nous faisons circuler cet air dans le caisson ; l'air est rejeté dans la zone D.

On arrête l'expérimentation dans les deux cas quand les différentes températures de l'air dans le caisson sont sensiblement égales à la température de l'air en amont du caisson-MCP et en aval du ventilateur.

### VII.2.1 – Fonctionnement diurne

#### VII. 2.1.1 – Vitesses débitantes

Les expériences ont été réalisées pour cinq vitesses du ventilateur obtenues à partir d'un variateur de tension. Les tensions utilisées sont : 100V, 125V, 150V, 190V et 230V.

Pour avoir la vitesse débitante moyenne en sortie (V2), nous mesurons les vitesses d'air « $\nu c$ » dans différentes bandes d'air (d'indice 'i') en sortie du caisson (Figure 105). Ensuite on calcul cette vitesse débitante en sortie (VS) à l'aide de l'équation VII.1.

Les vitesses et les débits d'air en aval du ventilateur du caisson-MCP obtenues pour les cinq vitesses utilisées du ventilateur sont présentés dans le Tableau 27.



*Figure 105 : Mesures des vitesses d'air à la sorti de caisson*

$$VS = \frac{q_v}{Sg} = \frac{1}{Sg}\Sigma\pi\left(R_i^2 - R_{i-1}^2\right)\cdot v_i \qquad \text{(VII.1)}$$

| Tensions (Volts) | 100 | 125 | 150 | 190 | 230 |
|---|---|---|---|---|---|
| Vitesses débitantes en sortie de caisson VS proportionnel aux vitesses mesurées "V2" (m/s) | 2,5 | 3,1 | 4,5 | 4,7 | 5,7 |
| Débits débitantes en sorti "Dd" ($m^3/s$) | 0,377 | 0,463 | 0,673 | 0,703 | 0,852 |

*Tableau 27 : Vitesses débitantes et débits en sortie du caisson en fonction des cinq vitesses du ventilateur*

### VII.2.1.2 – L'efficacité du rafraîchissement

La Figure 106 et la Figure 107 présentent l'évolution des différentes températures du dispositif au cours du temps à différentes vitesses du ventilateur.

La Figure 108 indique l'évolution de l'efficacité du rafraîchissement au cours du temps.

Nous définissons cette efficacité comme le rapport entre la différente de la température d'entrée et de sortie du caisson sur la différence de température d'entrée et de fusion du MCP (équation VII.2).

$$\varepsilon = \frac{T_1 - T_2}{T_1 - T_{mcp}} \qquad \text{(VII.2)}$$

Avant de commenter la Figure 106, nous pouvons noter que les températures d'air en amont de l'échangeur MCP (entre 40 °C et 45 °C) selon les vitesses testées sont largement supérieures à la température de fusion des MCP (28°C). Ce choix a été guidé par le fait que nous souhaitons effectuer ces essais rapidement, avant que les salles utilisées soient indisponibles pour cause de travaux. La durée des phases de fonte issues de nos expériences n'est ainsi pas représentative de celle qui existerait en situation réelle (pour laquelle l'air en amont de l'échangeur serait de 4 degrés supérieur à Tfonte = 28°C, pour ressortir à 2 degrés supérieures à Tfonte, ceci d'après les valeurs de température d'air retenus pour le dimensionnement de notre système) : en effet, le dimensionnement effectué sur le caisson MCP contenant du RT21 (Tfonte = 21°C) impose que l'air entre à 25°C pour sortir à 23°C**.**

De ce fait, la Figure 106 et la Figure 107 nous présentent l'évolution des températures et la Figure 108 présente l'efficacité de refroidissement. Dan ses différentes figures, on remarque que le refroidissement de l'air se fait en quatre phases :

- Phase I : phase de sous refroidissement. Le métal et le MCP sont à des températures inférieures à la température de fusion du MCP. Le refroidissement de l'air se fait grâce à la capacité calorifique sensible du métal et du MCP. De ce fait, nous avons une montée rapide de la température de l'air dans le caisson MCP (T1, T2, T3), ensuite elle a tendance à se stabiliser. C'est la phase la plus longue, elle met environ 3 heures à 4 heures en fonction des vitesses ;

- Phase II : phase de fusion. Au cours de cette phase, le MCP est plus froid que le métal. Le refroidissement de l'air est lié à la fusion du matériau à changement de phase. Comme on le voit sur la Figure 106, le refroidissement de l'air se fait lentement. Laquelle l'efficacité de refroidissement diminue plus lentement que lors de la première phase ;

- Phase III : phase de surchauffe. Le MCP a terminé sa fusion. De ce fait, l'élévation de la température de l'air se fait grâce à la capacité calorifique sensible du métal. De même l'efficacité de refroidissement va diminuer rapidement ;

- Phase IV : phase d'équilibre. Les fuites thermiques par les parois conditionnent l'équilibre en température de l'air. L'efficacité de refroidissement est nulle. Les températures sont presque les même tout le long du caisson.

Les courbes (a,b,c,d,e) de la Figure 108 sont difficilement quantitativement comparables car la température d'air en amont de l'échangeur varie d'une manipulation à l'autre, et est de surcroit non constante au cours de chaque manipulation. Des expériences en conditions mieux contrôlées sont programmées à courts termes.

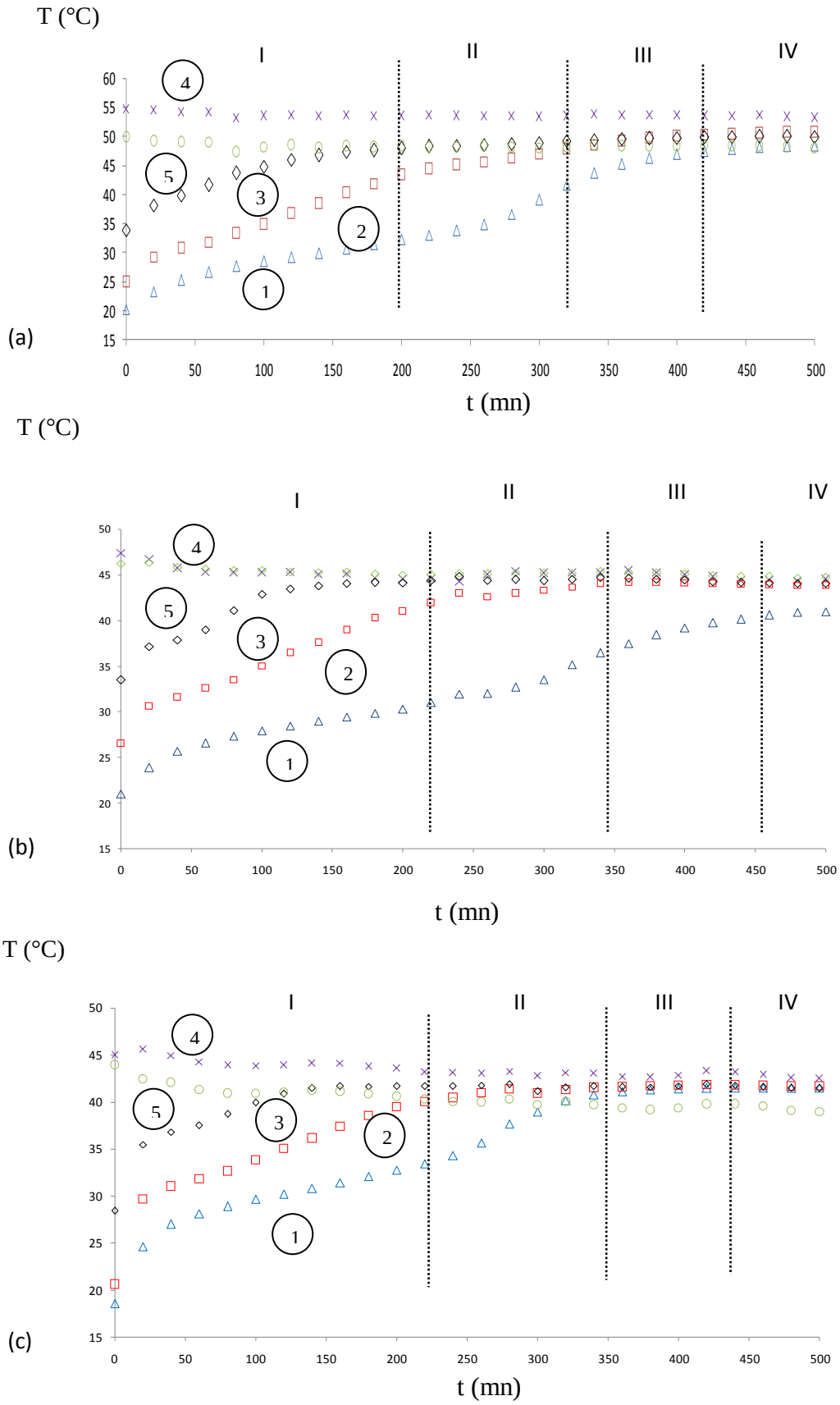



*Figure 106 : Evolution des différentes températures en fonction du temps lors du refroidissement de l'air du dispositif expérimental. (a) V2 = 2,5 m/s, (b) V2 = 3,1 m/s et (c) V2 = 4,5 m/s. (1) T1(Δ) température de l'air à l'aval de l'échangeur-MCP, (2) T2(□) température de l'air au milieu du caisson, (3) T3 (◊) température de l'air à l'entrée du caisson, (4) T4 (X) température en amont de l'échangeur- MCP et (5) T5 (○ ) température de l'air l'entrée du ventilateur.*

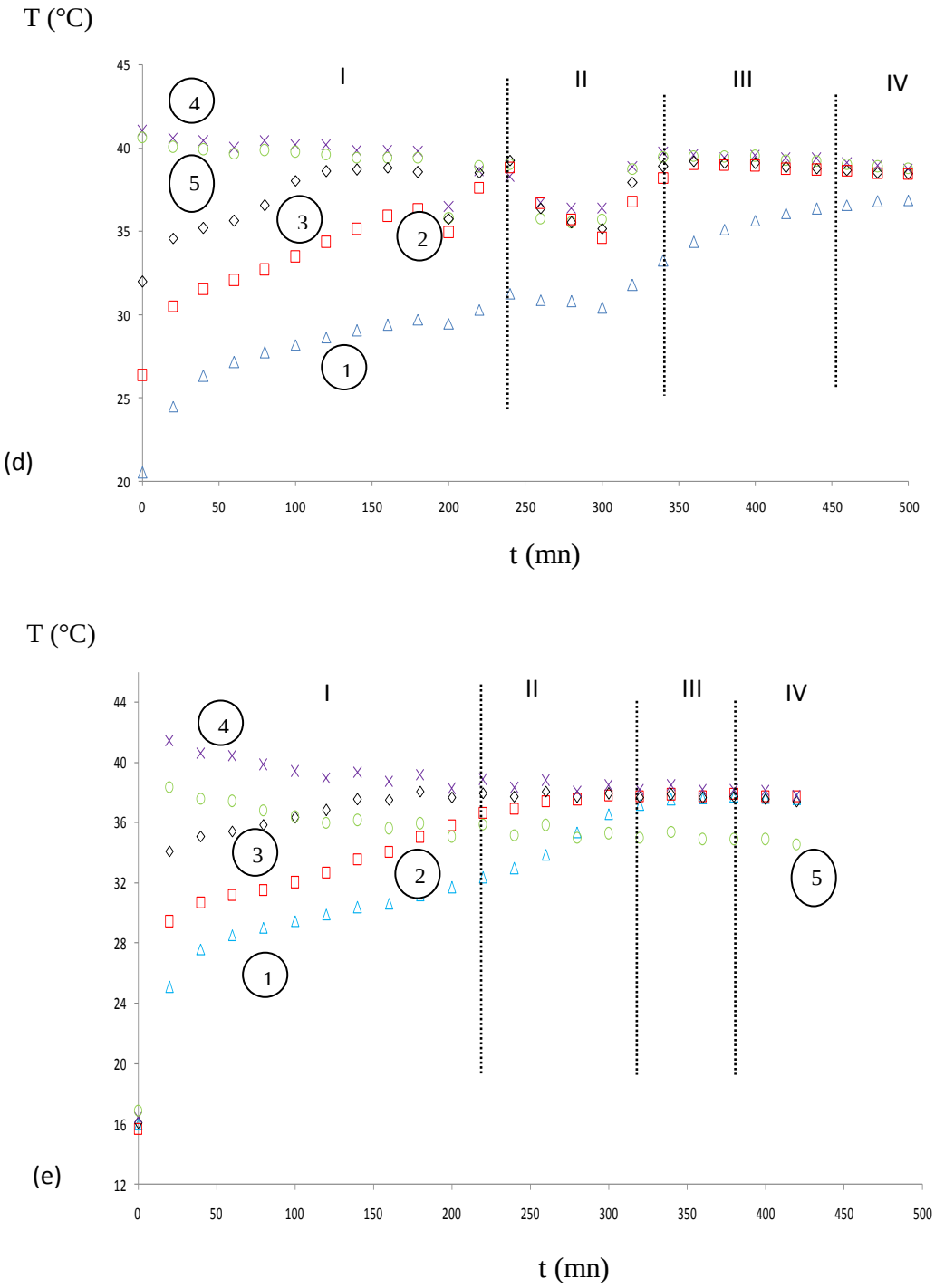



*Figure 107 : Evolution des différentes températures en fonction du temps lors du refroidissement de l'air du dispositif expérimental. (d)V2= 4,7 (e)V2 = 5,07. (1) T1 (Δ) température de l'air à l'aval de l'échangeur-MCP, (2) (□) T2 température de l'air au milieu du caisson, (3) T3 (◊) température de l'air à l'entrée du caisson, (4) T4 (X) température en amont de l'échangeur- MCP et (5) T5 (○) température de l'air l'entrée du ventilateur.*

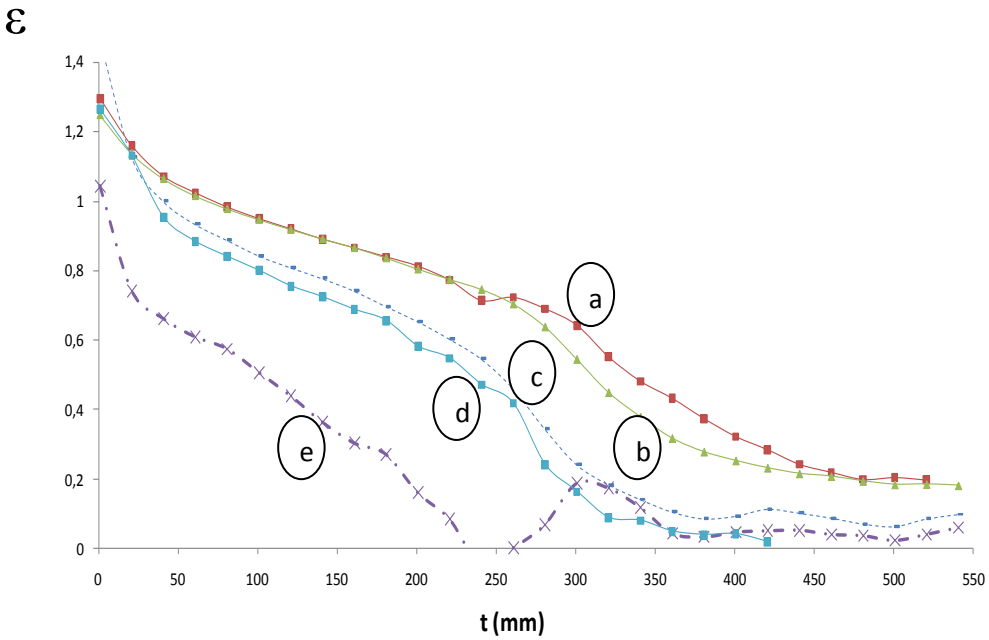



*Figure 108 : Evolution de l'efficacité de rafraîchissement en fonction du temps du dispositif expérimental pour les vitesses à la sortie du caisson suivant : (a) V2= 2,5 m/s, (b) V2 = 3,1 m/s, (c) V2 = 4,5 m/s, (d) V2 = 4,7 m/s, (e) V2 = 5,07 m/s.*

### VII.2.1.3 – Les pertes de charge aux bornes du circuit MCP

Les pertes de charge sont importantes au cours des échanges thermiques. Elles permettent de choisir le ventilateur adapté à notre système à partir du point de fonctionnement du système (intersection entre les courbes des pertes de charge du réseau aéraulique et du fonctionnement du ventilateur).

En ce qui concerne ces premiers essais, la Figure 109 montre l'évolution des pertes de charge de l'air circulant dans le faisceau de tubulaire en fonction de la vitesse débitante à la sortie de l'amas de tube d'air au carré c'est-à-dire le rapport entre le débit d'air en sortie de l'amas de tubes et la section du caisson contenant l'amas de tubes au carré. (Équation VII.3).

$$\Delta P = \xi_{sp} \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho_{air} \cdot \left( \frac{Q_2}{S_c} \right)^2 \qquad \text{(VII.3)}$$

où $\xi_{sp}$ est la sommation des pertes de charge absolues dans les divers éléments du système, $S_c$ est la section du caisson contenant l'amas de tubes, $Q_2$ est le débit d'air à la sortie de l'amas de tubes dans le caisson.

On constate que cette courbe n'évolue pas en fonction du carré des vitesses débitantes.

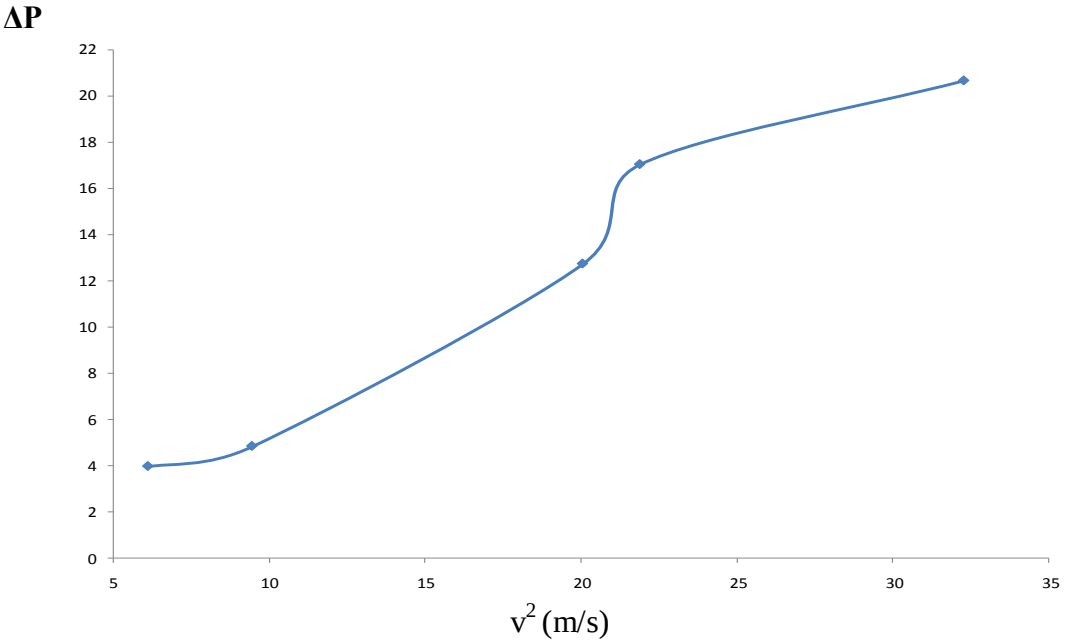



*Figure 109 : Evolution des pertes de charge en fonction des vitesses débitantes à l'entrée du ventilateur du dispositif expérimental*

### VII.2.1.4 – Le coefficient des pertes de charges

C'est le rapport de la perte de charge à la pression dynamique dans une section considérée. Dans le contexte de nos travaux, c'est le rapport entre les pertes de charge et le carré de la vitesse débitante à la sortie du caisson (équation VII.4).

$$\xi = \frac{\Delta P}{0{,}5 \cdot 1{,}225 \cdot V_2^{\,2}} \qquad \text{(VII.4)}$$

En regardant les valeurs des premiers essais de la Figure 110, nous remarquons que $0{,}8 < \xi < 1{,}25$. Donc nous avons un coefficient de charge convenable, on peut en

déduit que de la pression perdue et la pression dynamique sont sensiblement égales quelque soit la vitesse débitante.

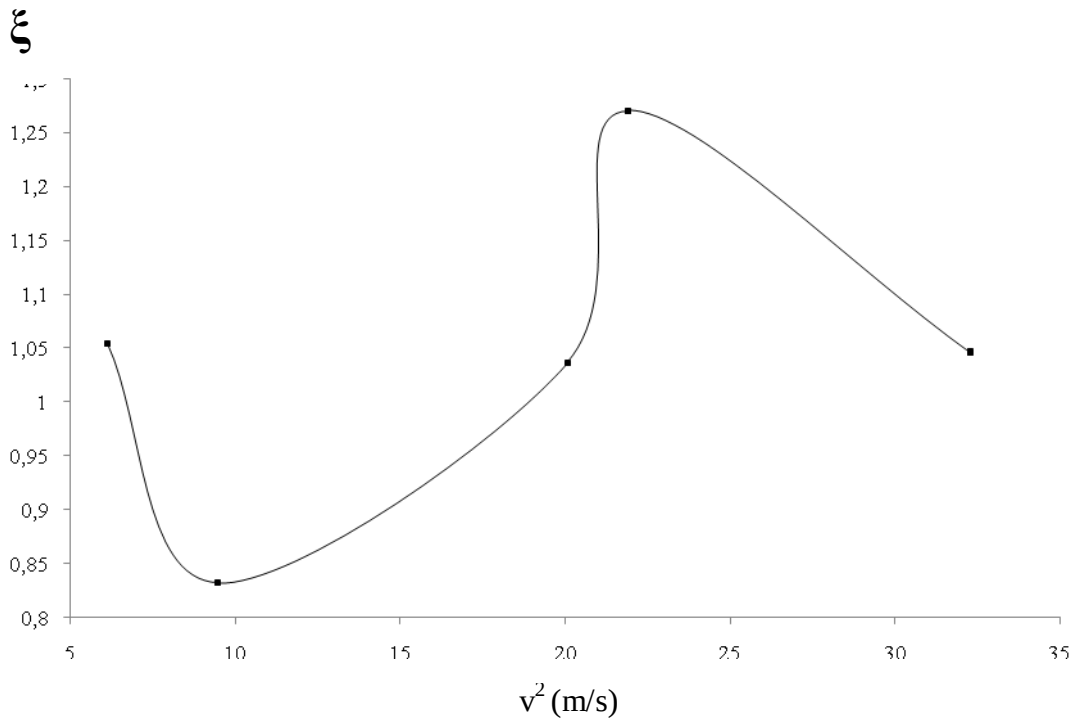



*Figure 110 : Evolution du coefficient des pertes de charge en fonction des vitesses débitantes à la sortie du ventilateur du dispositif expérimental*

### VII.2.1.5 – La puissance transmis au fluide

La valeur de la puissance à transmettre au fluide est très importante car elle participe au choix du ventilateur. Elle permet d'exprimer la puissance nécessaire du ventilateur pour que le fluide puisse assurer les échanges thermiques prévus du système. Elle permet aussi d'avoir un peu plus de précision sur le rendement total (le rendement mécanique, de transmission du moteur du ventilateur, le rendement hydraulique et le rendement volumétrique) du système c'est-à-dire l'énergie dégradée lors du fonctionnement du ventilateur.

Dans notre cas, la puissance transmis au fluide s'obtient comme suit :

$$P_{tr} = \rho_{air} \cdot q_{vair} \cdot Cp_{air} \cdot (T_e - T_s) \qquad \text{(VII.5)}$$

La Figure 111 présente les évolutions des puissances transmises au fluide au cour du temps pour les différentes vitesses utilisées et la Figure 112 présente la puissance transmis par rapport à la variation de la température lors de la fusion des MCP au cours du temps

Losqu'on regarde ses deux figures, on constate que les fusions des MCP se font à peu près pour une puissance de 11 kw avec une température supérieur à la température de fonte $\Delta T = T4\text{-}Tf \approx 16$ °C. On enduit qu'il faut à peu près 0,7 (11 kW/16 °C) kW/°C pour avoir une bonne fusion des MCP c'est-à-dire un bon échange thermique. Pour le dimensionnement de notre système, nous avons estimés qu'il nous fallait une température supérieur à la température de fonte de $\Delta T = T4\text{-}Tf \approx 4$ °C, on enduit qu'il faut à peu près une puissance de transmission de 2,8 kW pour avoir une bonne fusion des MCP lors du fonctionnement du système.

Ptr (W)

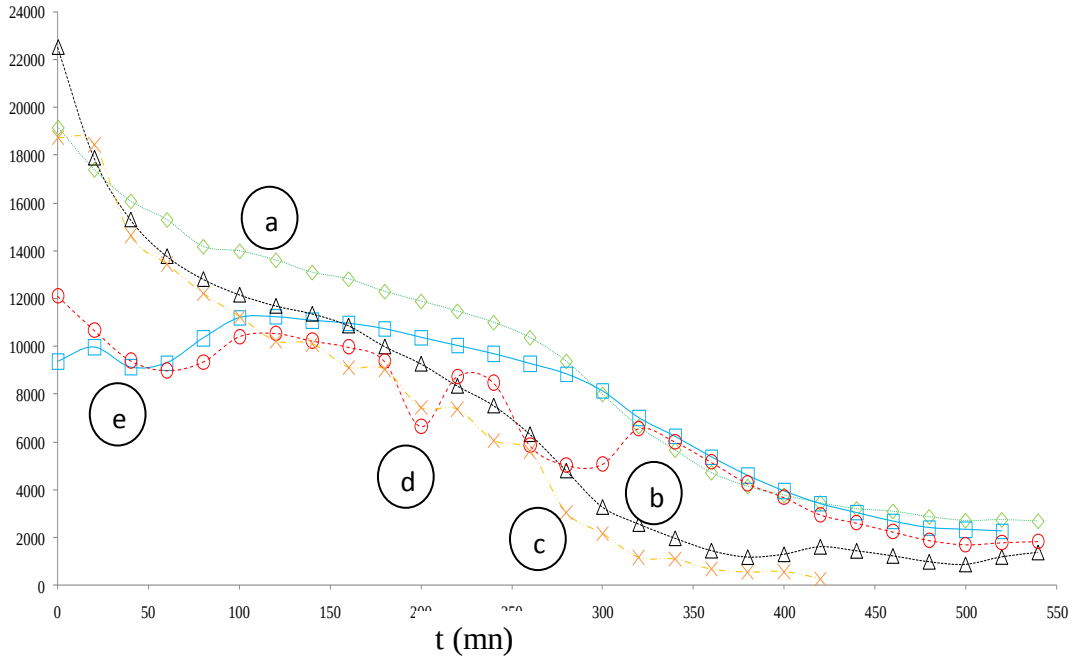



*Figure 111 : Evolution des puissances transmises au fluide en fonction du temps pour les vitesses en aval du caisson : (a) V2= 2,5 m/s, (b) V2 = 3,1 m/s, (c) V2 = 4,5 m/s, (d) V2 = 4,7 m/s, (e) V2 = 5,07 m/s.*

$$\frac{P_{tr}}{(T_4 - T_f)}$$

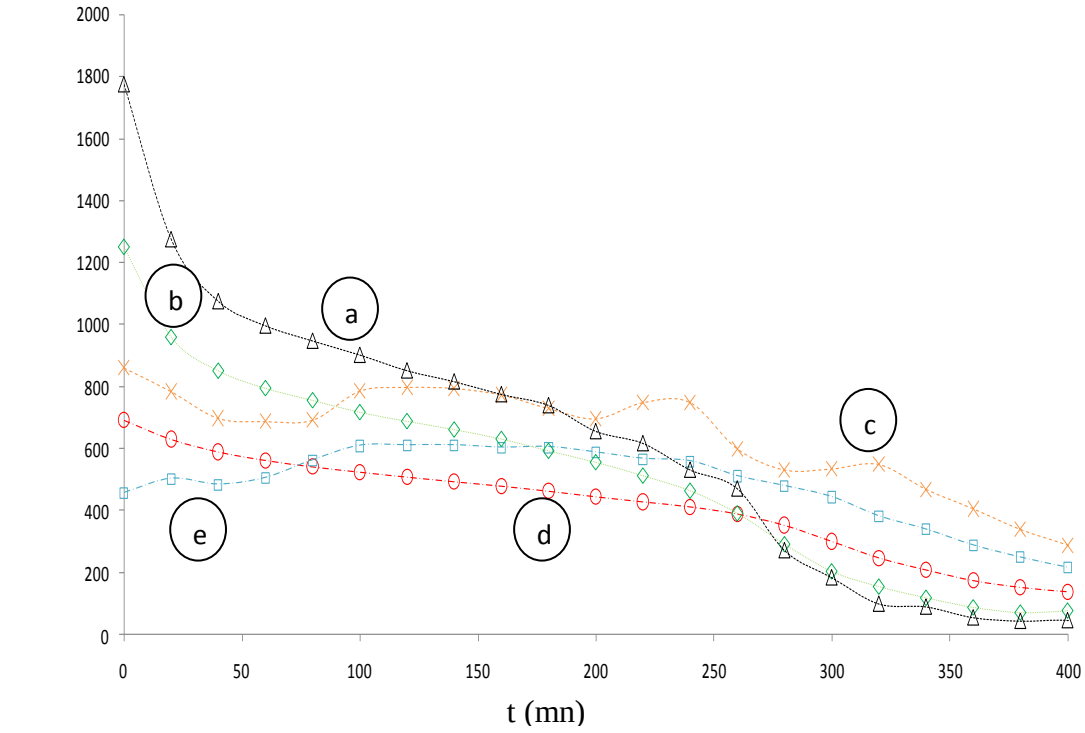



*Figure 112 : évolution de la puissance transmis par rapport à la variation de température au cours du temps pour les différentes vitesses utilisés lors des essais : (a) V2= 2,5 m/s, (b) V2 = 3,1 m/s, (c), V2 = 4,5 m/s, (d) V2 = 4,7 m/s, (e)V2 = 5,07 m/s.*

### VII.2.2 – Fonctionnement nocturne : solidification des MCP

L'objectif de ce paragraphe est de suivre l'évolution de la solidification des MCP.

La procédure utilisée consiste, après chaque phase de fonctionnement diurne (fusion du MCP), on arrête le ventilateur et on ouvre les ouvertures de la zone A (salle de mise en température de l'air en amont) afin de diminuer la température de cette salle (Figure 101). De ce fait, la solidification des MCP commence par convection naturelle. Lorsque la température de la zone A (zone de mise en température) est inférieure à 27°C (température de changement de phase du MCP utilisé), on redémarre le ventilateur. La solidification des MCP continue par convection forcée. Ensuite, on arrêtait le ventilateur et le logiciel de mesure par sécurité et la régénération des MCP se terminait par convection naturelle.

Comme nous l'avons signalé lors de l'analyse des résultats sur le fonctionnement diurne, les essais se sont passés en hiver (décembre 2010). Les températures d'air en amont de l'échangeur MCP (20°C-11°C) sont largement inférieures aux températures de fusion des MCP (28°C). De ce fait la durée des phases de régénération issues de nos expériences n'est pas ainsi représentative de celle qui existerait en situation réelle.

La Figure 113 présente l'évolution des différentes températures dans le dispositif expérimental. On constate dans cette figure que les températures de l'air à l'intérieur du caisson ont la même allure quelque soit la vitesse ou la durée de cette phase. La solidification des MCP se fait en trois phases :

Phase I : le métal et le MCP ont des températures inférieures à la température de solidification des MCP. Il y a un échange thermique air/métal par convection naturelle. De ce fait, les températures diminuent lentement. La régénération des MCP se fait grâce à la capacité calorifique du métal ;

Phase II : les températures diminuent un peu plus vite que lors de la première phase. C'est le début des échanges thermiques réalisés par convection forcée. C'est le démarrage de la solidification des MCP. Il y a des échanges thermiques air/métal/MCP.

Phase III : la solidification des MCP se termine. Les fuites thermiques par les parois conditionnent l'équilibre en température de l'air. Les températures de l'air au sein du caisson ont l'allure des droites.

Ces premiers résultats sont difficilement quantitativement comparables car la température d'air en amont de l'échangeur varie d'une manipulation à une autre et de surcroit non constante au cours de chaque manipulation. Des expériences en conditions mieux contrôlées sont programmées à courts termes.

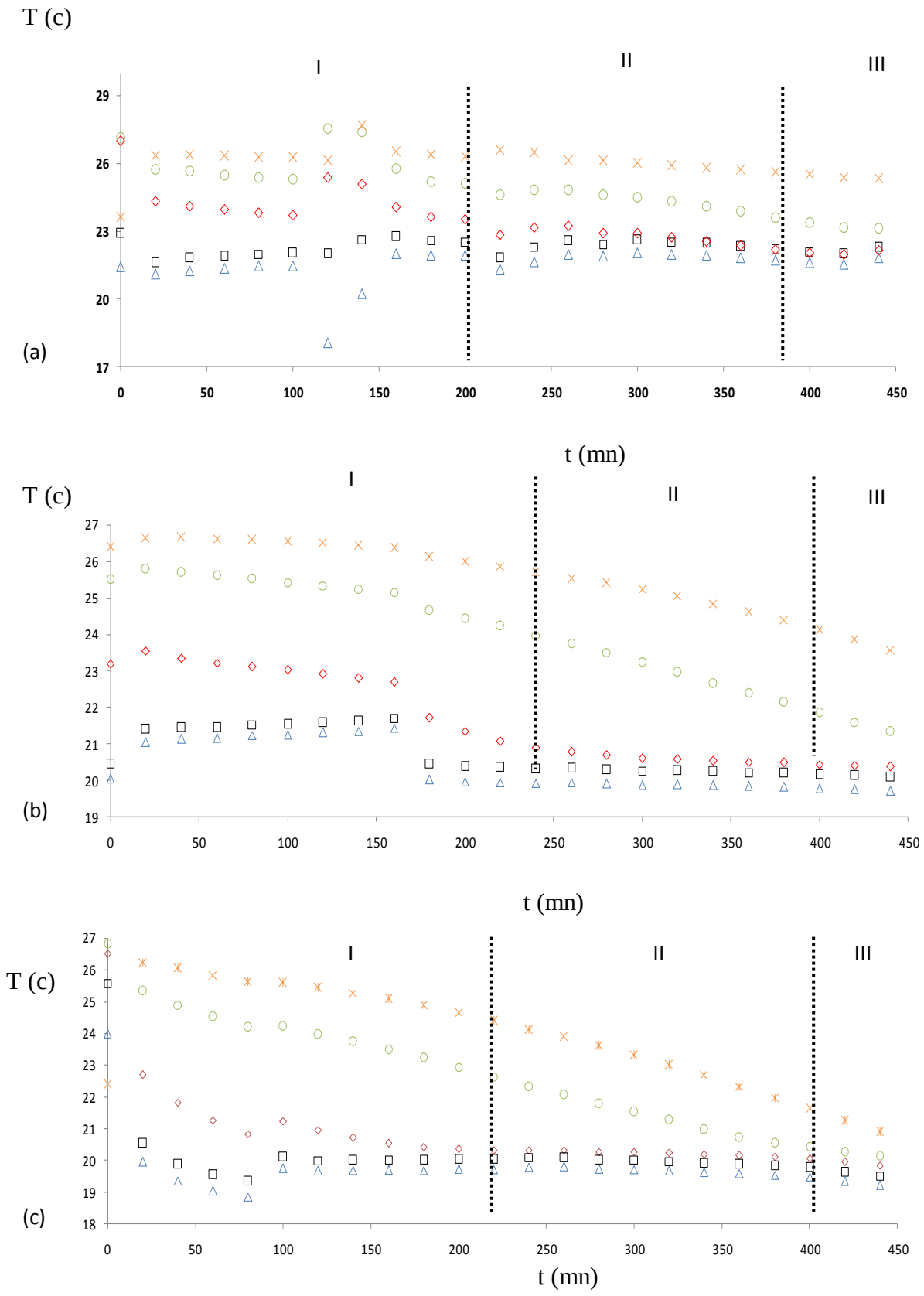



***Figure 113 :*** *Evolution des différentes températures en fonction du temps lors de la génération des MCP du dispositif expérimental à différentes vitesses : (a) V2 = 3,1 m/s, (b) V2 = 4,5 m/s, (c) V2 = 5,07 m/s. (1) T1 (X) est la température de l'air à la sortie du caisson, (2) T2 (○) est la température de l'air au milieu du caisson, (3) T3 (◊) est la température de l'air à l'entrée du caisson, (4) T4(Δ) est la température de l'air avant le ventilateur et (5) T5 (□) est la température de l'air après le ventilateur.*

### *VII.3 – Le fonctionnement du système au salon Solar Décathlon Europe (Madrid)*

Au cours du Solar décathlon 2010 (SDE 2010), le système a été installé dans la maison Napévomo. Il a montré à Madrid sa capacité à assurer le refroidissement nécessaire sur 6 jours des 10 jours de concours, ceci sous des conditions de températures estivales (Figure 114).

En effet, malgré des niveaux de températures extérieures approchant les 35°C et des niveaux d'éclairements solaires approchant les 1100 W/m$^2$, sa capacité de stockage d'énergie et de puissance d'échange se sont avérées suffisantes, et son aptitude à la régénération nocturne acceptable. Sa fiabilité a été assurée par sa robustesse mécanique intrinsèque de l'échangeur et la simplicité de son système de pilotage en tout ou rien, basé sur 2 mesures de températures en entrée et sortie (Bruneau et al. 2010).

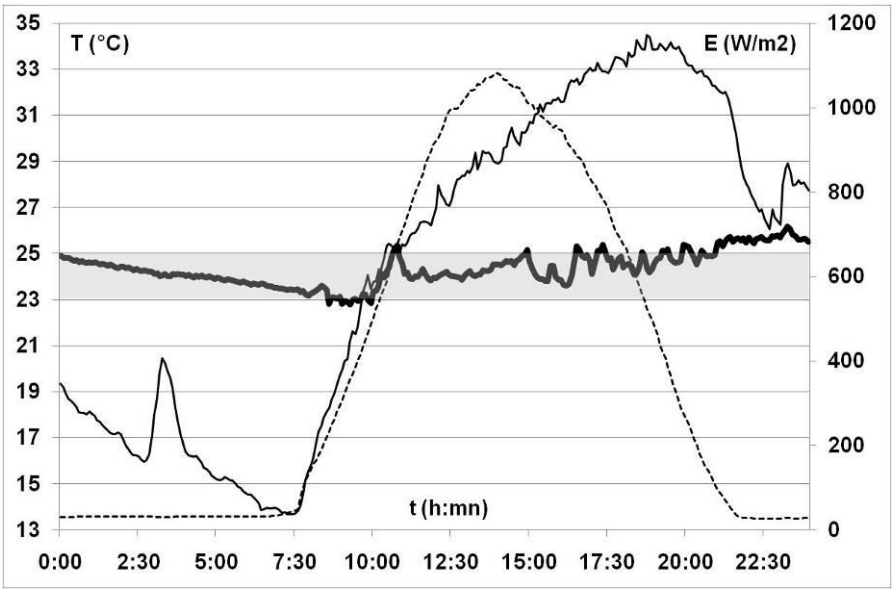



***Figure 114*** *: Température de l'air intérieur (ligne continue épaisse) et de l'air extérieur (ligne continue) et éclairement solaire direct (ligne pointillée). Journée du 22 juin 2010 à Madrid (d'après Bruneau et al, 2010).*

### *VII.4 – Conclusion*

Dans ce paragraphe, nous avons présenté les premiers résultats de l'évolution du rafraîchissement de l'air dans un échangeur Air-MCP et celles obtenu par le système à Madrid.

La période des essais (décembre 2011) et le système mis en place nous a obligé avoir des températures d'air en amont de l'échangeur (40°C-50°C) largement supérieurs aux températures de fusion des MCP (28°C) lors des essais de rafraîchissement et Les températures d'air en amont de l'échangeur MCP (20°C-22°C) largement inférieures aux températures de solidification des MCP (28°C) lors de la régénération des MCP comme nous l'avons explique dans le § VIII.3.1.1. De ce fait, nous n'avons pas pu respecter le critère $\Delta T = Te - Ts = 4°C$ comme prévu par le code de calcul. Sinon nous avons pu avoir des résultats encourageants.

A cet effet, au cours des essais nous avons constaté que l'efficacité de rafraîchissement se fait en quatre phases : phase de sous refroidissement, phase de fusion, phase de surchauffe et phase d'équilibre. Pendant ses phases on constate la capacité calorifique du métal joue un rôle important notamment lors du sous refroidissement et de la phase de l'équilibre.

Les pertes de charges dans le caisson sont à peu près les mêmes que celles que nous avons estimés pour chaque essai. La suite des essais qui se feront dans les conditions climatiques prévues nous permettra de vérifier si nous avons choisi un bon ventilateur.

Nous avons un coefficient de pertes de charge qui est compris entre 0,8 et 1. C'est-à-dire que la pression perdue et à la pression dynamique sont sensiblement égales.

La puissance transmis au fluide se fait en quatre phases. Dans un premier temps, elle diminue rapidement. Ensuite elle se stabilise. Par la suite cette diminution se fait lentement pendant la moitié du fonctionnement du système. Elle reprend rapidement au cours de la troisième phase. Nous avons constaté qu'il fallait en moyenne 0,7 Kw/°C pour avoir une bonne fusion des MCP c'est-à-dire un bon échange thermique.

Nous avons constaté que plus la vitesse de l'air était importante plus la solidification se fait rapidement par unité de longueur. Quelque soit la température, la stabilisation de la température se faisait en même temps ce qui entraînait des ΔT importants.

Le contexte dans laquelle les essais se sont déroulés, que nous vous avons expliqué dans les § VII.2.1.1 et VII. 2.2, rendent les résultats difficilement quantitativement comparables. Des expériences en conditions mieux contrôlés sont programmées à courtes termes.

Pendant le concours Solar Décathlon 2010 (SDE 2010), le système installé dans la maison Napévomo a pu assurer le confort de ce dernier sur 6 jours des 10 jours de concours.

## VIII – Analyse économique succincte d'un échangeur Air-MCP pour le rafraîchissement et réchauffement d'un bâtiment

L'objectif de ce paragraphe est voir quelles sont les avantages un échangeur Air-MCP pour le rafraîchissement et réchauffement d'un bâtiment par rapport aux systèmes utilisés habituellement comme la VMC double flux.

Certes, il peut être encore trop tôt de comparer ce système avec les modèles de rafraichissement ou de réchauffement de bâtiment existant actuellement dans le marché, mais on peut avoir une idée sur son impact sur l'environnement des usagers.

En effet, lorsqu'on regarde le Tableau 28, On constate que notre système a un prix abordable. Les MCP représente à peu près le 2/5 du coût soit à peu près 42%. Sachant qu'on ne tient pas compte de la main d'ouvre. Donc en améliorant les solutions technologiques du système, en choisissant la meilleure solution pour améliorer la conductivité des MCP et réduisant le coût du travail, ce montant peut être réduit considérablement pour une fabrication en série.

A cet effet, nous pensons que l'investissement pour ce type d'équipement est raisonnable car :

- d'après une étude réalisée en 2007 par le Centre de Thermique de Lyon et réunissant de nombreux partenaires du domaine, ces derniers ont évalués le retour sur investissement d'un tel équipement en 8 ans ;

- les MCP ont une durée de vie très longue ;

- au niveau environnemental, les MCP polluent moins que les autres systèmes de rafraîchissement et de réchauffement de bâtiment ;

La suite des travaux nous permettra d'apporter un peu plus précision sur les avantages d'un tel équipement pour le rafraîchissement et le réchauffement des bâtiments.

| **Matériaux** | | | **Quantité** | **P.U.** | **Coût (€)** |
|---|---|---|---|---|---|
| Différentes pièces de l'échangeur | Contenants de MCP | Tube (mm) 40x30x2 | 170 | 13,9 | 2363 |
| | | Tube (mm) 20x10x2 | 22 | 20 | 440 |
| | | Tube de cuivre | 30 | 2,48 | 74,4 |
| | **Total A** | | | | **2877,4** |
| | Système de remplissage, vidange et dilatation des contenants MCP | Raccord | 210 | 0,84 | 176,4 |
| | | Te en cuivre | 305 | 0,25 | 76,25 |
| | | Coude | 16 | 0 ,17 | 2,72 |
| | | Joint | 3 | 21,02 | 62,06 |
| | | Brasure | 4 | 155,66 | 622,64 |
| | | Pot de colle | 2 | 56,48 | 112,96 |
| | **Total B** | | | | **1093,03** |
| **Total I (A+B)** | | | | | **3970,43** |
| MCP | | RT21 | 280 | 6,5 | 1820 |
| | | RT28 | 280 | 8,25 | 2310 |
| **Total II** | | | | | **4130** |
| Matériaux pour l'amélioration de la conductivité | | Fil galvanisé | 8 kg | 3,76 | 30,08 |
| | | Graphite | 10 sacs | 130,4 | 1304 |
| **Total III** | | | | | **1334,08** |
| **Total I+II+III** | | | | | **9189,51** |

*Tableau 28 : Estimation du coût financier du système composé de 4 échangeurs Air-MCP*

## IX – Conclusion générale et perspectives

L'objectif de cette thèse était de concevoir, dimensionner et fabriquer un système de rafraîchissement et de réchauffement à base de matériaux à changement de phase (MCP) pour une maison passif. Cette dernière participant au concours du Solar Décathlon 2010 (SDE 2010).

Pour atteindre cet objectif, dans un premier temps nous avons réalisé une étude détaillée sur les systèmes de rafraîchissement et de réchauffement de bâtiment à base de MCP dont les résultats des travaux sont largement publiés. Nous avons constaté qu'il y avait deux catégories de systèmes :

Les systèmes passifs (systèmes non actionnés par un élément mécanique) et les systèmes actifs (systèmes actionnés par un élément mécanique). Les systèmes passifs ont deux problèmes majeurs : d'une part une limitation globale de la masse de MCP concernée et d'autre part une limitation constatée à transférer la chaleur. En ce qui concerne les systèmes actifs, il en ressort qu'il y a deux familles de systèmes actifs : les systèmes actifs utilisant les MCP en plaques et ceux utilisant les MCP en amas. Les systèmes actifs utilisant les MCP en plaques ont la possibilité de contenir des quantités importantes de MCP mais leur conductivité n'est pas bonne. Ils ont une bonne compacité en général. Les systèmes actifs utilisant les MCP en amas ont une bonne conductivité mais ne peuvent pas contenir des quantités importantes de MCP. Ils ont un bon rapport masse de MCP sur le débit d'air.

Ensuite nous avons défini le Cahier des Charges du système qui contient les besoins énergétiques de la maison Napévomo, les contraintes liées à la participation de la maison Napévomo au concours Solar décathlon et les contraintes liées à l'intégration du système dans cette maison.

A partir de l'état de l'art des systèmes de rafraichissement et de réchauffement des bâtiments à base de MCP et du Cahier des Charges du système à concevoir, nous avons défini, conçu, dimensionné et fabriqué à l'échelle 1 un échangeur Air-MCP. Ce dernier est dimensionné à partir d'un code de calcul stationnaire, basée sur une approche NUT-$\varepsilon$ moyennant une caractérisation préalable des MCP. Les dimensions de cet échangeur sont validées en fonction des pertes de charge et du COP (coefficient

de performance). Cet échangeur Air-MCP est composé d'un amas de contenants de MCP. Ces derniers sont montés en quinconces afin d'avoir un bon échange thermique entre l'air/contenant de MCP/MCP. Pour améliorer cet échange thermique, nous avons fixés des déflecteurs sur les contenants des MCP. Pour améliorer la conductivité des MCP, mis à part les dimensions des contenants de MCP, nous expérimentons deux concepts : le mélange des MCP/graphite et la fixation d'un fil métallique au cœur du MCP dans les contenants des MCP.

Nous avons fabriqué un dispositif qui permet le remplissage, la vidange et la dilatation des MCP. Il est composé d'un ensemble de tubes en cuivre. Il est fixé en bout de l'amas de contenants des MCP.

Notre système de rafraîchissement et de réchauffement est composé de quatre échangeurs Air-MCP contenant 720 kg de MCP et un circuit aéraulique. Il a une consommation d'électricité de 24 W et un taux de renouvellement d'air estimé à 7,25. Il a un coefficient de performance de 5 et les pertes de charge sont estimées à 17, 584 Pa.

Nous avons effectué les premiers essais de fonctionnement sur l'un des échangeurs Air-MCP. Certes, nous n'avons pas pu réaliser ces essais dans les conditions extérieures précuis (les essais ont été réalisés en Décembre 2010), néanmoins ils sont très encourageants. Nous avons constaté que ce dernier arrivait à rafraîchir l'air pendant 8 - 10 heures comme convenu. Il permettait de régénérer les MCP pendant 7-8 heures. Les pertes de charge obtenu sont les mêmes que celle que nous obtenu par la théorie. De ce fait, le choix du ventilateur a été bien fait.

Au cours du concours Solar décathlon à Madrid (SDE 2010), le système installé dans la maison Napévomo a été expérimenté. Son fonctionnement lors du concours à Madrid a été à la hauteur de nos attentes. Il a pu rafraîchir la maison sur 6 jours des 10 jours de concours ceci sous les conditions de températures estivales. Sa capacité de stockage d'énergie et la puissance d'échange se sont avérées satisfaisantes. Son aptitude à la régénération nocturne s'est avérée acceptable. Ce système innovant de la maison Napévomo a permis d'obtenir le 2° prix de l'innovation lors du concours.

Ces travaux de thèse ont été très enrichissants. Ils m'ont permis de travailler dans un cadre complémentaire à celui d'une école doctorale où la principale contrainte

est d'avoir un certain résultat au bout de trois ans de travaux de recherche. Dans notre cas, il fallait obtenir un système innovant qui fonctionne parfaitement à l'échelle 1 à une date butoir. A cela, il fallait intégrer non seulement les contraintes temporelles des travaux de recherches d'une conception et réalisation d'un équipement innovant mais aussi celles liées à la coordination avec l'ensemble des partenaires qui participait à la réalisation de la maison Napévomo dont la plupart expérimentaient aussi leurs équipements.

Ils m'ont aussi permis de travailler sur un sujet de thèse qui au travers de son application directe au SDE2010 et au-delà au travers des développements futurs du prototype faisant l'objet de ma thèse, m'ont apporté une maturité forte.

**Les perspectives sont de deux ordres** :

(i) poursuivre les essais pour : écrire le modèle qui valident le comportement physique du système, améliorer les solutions technologiques du système notamment les contenants du MCP et le système de remplissage, de vidange et de dilatation, de même que poursuivre les travaux sur l'amélioration de la conductivité des MCP pour avoir une meilleur compacité de l'échangeur (stockage d'énergie) c'est-à-dire une bonne densité énergétique.

(ii) entreprendre un transfert de technologie dans les pays du sud notamment au Gabon où nous expérimenterons ce système accouplé à certains systèmes comme le puits canadien. Car, dans ce pays, le seul système utiliser pour rafraichir les bâtiments est le climatiseur « split ». Malheureusement, ce dernier n'est pas à la portée de toutes les couches sociales. A cet effet, nous pensons que de tels systèmes peuvent palier à ce problème. Surtout dans ce pays où les conditions climatiques (température moyenne 36°C durant l'année) sont favorables et qu'il est possible d'avoir plus facilement les MCP (pays producteur de pétrole).

## X – Bibliographies


ADNOT J. – EERAC "Energy Efficiency of Room Air-Conditioners" – Study for the Directorate General for Energy (DGXVII) of the Commission of the European Communities – 1999.

AMAR M. et al. – A review on energy conservation in building applications with thermal storage by latent heat using phase change materials - Energy Conversion and Management (45 263–275) – 2004

ARKAR C. et MEDEVED S. – Influence of accuracy of thermal property data of a phase change material on the result of a numerical model of a packed bed latent heat storage with spheres – Thermochimica acta (192-201) – 2005.

ARKAR C. et MEDEVED S. – free cooling of buildings using PCM heat integrated into the ventilation system – Solar energy (1078-1087) – 2007.

ARKAR C. et al. – Efficient of free cooling using latent heat storage integrated into the ventilation system of a low energy building – Refrigeration (134-143) – 2007.

ARMAND S. – Validation de la conception bioclimatique d'une maison à énergie positive – Rapport de stage, Arts et Métiers paris Tech, centre de Bordeaux-Talence – 2010.

ATUL S. et al. – Review on thermal energy storage with phase change materials and applications – Renewable and sustainable energy reviews (999-1031) – 2007.

BANER D. et al. – Memotech – Sciences de l'ingénieur – 2003.

BENMANSOUR A. – Etude numérique du stockage de l'énergie thermique en lit multicouche, 18° Congrès Français de Mécanique, Grenoble – CFM 2007 –2007.

BRICARD A. et GOBIN D. – Transfert de chaleur avec changement d'état solide-liquide – technique de l'ingénieur, traité génie énergétique (Réf. BE8240) – 2001.

BRUNEAU D. et al. – Sizing of an innovation and improved meat smoking system – International journal of food Engineering – 2005.

BRUNEAU D. et al. – Napévomo house : a sustainable and innovative strategy to reduce energy and water consumption –intelligent energy (Ten act 10 n) – 2010.

BOURDEAU L. – Utilisation d'un matériau à changement de phase dans un mur trombe sans thermo circulation – Revue physique appliquée 17 (633-642) – 1982.

BOURGEAOIS R. et al. –Génie des matériaux – Memotech – 2001.

BONY J., et CITHERLET S. – Numerical model and experimental validation of heat storage with phase change materials – energy and buildings (1065-1072) – 2007.

BUFALINO S. – Les matériaux à changement de phase – Dossier thématiques "Enterprise Europe network" – 2008.

BUTALA V. et al. – Experimental investigation of PCM cold storage – Energy and buildings – (354-359) 2009.

CHEVALIER A. – Guide du dessinateur industriel – Hachette technique – 1994.

CITHERLET S. et BONY J. – Cosypcm combi-système avec matériaux à changement de phase – Rapport annuel de l'office fédéral de l'énergie OFEN – 2004.

DAUVERGNE J.L. - Réduction et inversion de problèmes de diffusion thermique avec changement de phase – Thèse de l'université de Bordeaux I – 2008.

FARID M.M. et al. – A review on phase change energy storage: materials and applications – Energy conservation and management – (45, 1597-1615) 2004.

FISH M.N. et al. – Use of microencapsulated phase change materials in office blocks – Institute für gebaüde-und solartechnik (IGS) – 2004.

GILBERT J. et al. – Panneaux à inertie thermique – Dupont™ Energain®, – 2007.

GOUBING Z. et al. – Numerical analysis of effect of shape-stabilized phase change material plates in a building combined with night ventilation (52-59) – 2009.

HAITING C. et al. – thermal performance analysis for a heat receiver using multiple phase change materials – Applied Thermal Engineering (2353-2361) – 2003

HAWES D.W. – Latent heat storage in building materials – energy and buildings – (77-86) 1993.

HED G. et BELLANDER R. – Mathematical modeling of PCM air heat exchanger - Energy and Buildings – 2005.

Heim D. et Clarke J.A. – Numerical modeling and thermal of PCM-gypsum composite with ESP-r – energy and building (795-805) – 2004.

I.E. Idel'clik – Memento des pertes de charge, Coefficients de pertes de charge singulières et de pertes de charge par frottement – Eyrolles – 1986.

JANNOT Y. – Transferts thermiques – Notes de cours – 2003.

JOUSSELIN F. et al. – Enveloppe hybride pour bâtiment économe – UIT 1 Grenoble, département génie civil – 2007.

KANG Y. et al. – Modelling and experimental study on an innovative passive cooling system/NVP system – Energy and buildings (417-425) – 2003.

KAYGUSUZ K. – Experimental and theoretical of investigation of combined solar heat pump system for residential heating – Energy and building – 1998.

KHERROUF S. – Améliorer le confort thermique en période chaude des locaux sous toiture légère dans les bâtiments existants par le traitement adapté des composants d'enveloppe – rapport final de la convention ADEME-EDF n°05 04 C 0001 – 2008.

KHUNDHAIR G. et al. – A review on energy conservation in building applications with thermal storage by latent heat using phase change materials – Energy Conservation –(45, 263-275) 2004.

KUNPING L. – Modeling and simulation of under floor electric heating system with shape-stabilized PCM plates – building and environment - 2004.

KUNPING L. – Study of an electrical heating system with ductless air supply and shape-stabilized PCM for thermal storage – energy conversion and management – 2007.

KURKLU A. – Energy storage applications in greenhouses by means of phase change materials (PCMs): a review – Pergamon, Renewable Energy – 1998.

MAHA A. – Thermal testing and numerical simulation of a prototype cell using light wallboards coupling vacuum isolation panels and phase change material – Energy and buildings –(673-681) 2005.

LAZARO A. et al. – PCM-air heat exchangers for free-cooling applications in buildings: experimental results of two real-scale prototypes – Energy conversion and management – 2009.

LIGEL J. et GUAY L. – Pertes de charge – Collection le boursicaut – 2007.

MORISSON V. – Heat transfer modelling within graphite/salt composites: from the pore scale equations to the energy storage – These de doctorat de l'université de Bordeaux I – 2008.

NADEAU J.P. – Energétique Industrielle - Notes de cours –Ecole nationale Supérieur d'Arts et Métiers, Paristech, ENSAM Bordeaux – 2006.

NOEL J. et al. – amélioration du confort d'été sur les bâtiments à ossature légère par des matériaux à changement de phase – compte rendu de la journée thématique SFT-IBPSA froid solaire et confort d'été – 2007.

PASCAL G. – GlassX, les matériaux à changement de phase – Les cahiers techniques du bâtiment N°295 - 2010.

PEUPORTIER B. et THIERS, S. – Des éco-techniques à l'éco-conception des bâtiments – Société Française de thermique SFT-IBPSA, Journée thématique – 2006.

RIEDERE P. et CATARINA O. – Comparaison international bâtiment et énergie, C7 – Stockage de chaleur, ADEME-PUCA-CSTB C151 – 2007.

REGIN F. A. et al. – Heat transfer characteristics of thermal energy storage system using PCM capsules: review – Renewable and sustainable energy reviews – 2007 (2438-2458).

SALOMON T. et al. – Outil de simulation thermique du bâtiment, Comfie – Société Française de thermique SFT-IBPSA, Journée thématique – 2005.

SAMAN W. et al. – Thermal performance of PCM thermal storage unit for a roof integrated solar heating system – Solar energy – (341-349) 2005.

SCARAVETTI D. – formulation d'un problème de conception, pour l'aide à la décision en conception préliminaire – thèse de docteur à l'Ecole Nationale Supérieure d'Arts et Métiers, Paristech, centre de Bordeaux-Talence – 2004.

SEMPEY A. et al. – Intégration d'un modèle simplifié de matériau hygroscopique dans une plate-forme d'aide à la conception énergétique de bâtiments : application aux parois bois massives. – CIFT 2009 – 2009.

SHARMA A. et al. – Review on thermal energy with phase change materials and applications – (318-345) 2007.

STRITIH U. et NOVAK P. – Solar heat storage wall for building ventilation, WREC – 1996.

TAKEDA S. et al. – Development of a ventilation system utilizing thermal energy storage for granules containing phase change material – Solar energy – 2004.

TURNPENNY J.R.et al. – Novel ventilation cooling system for reducing air conditioning in buildings. Part I: testing and theoretical modeling – Applied thermal engineering – 1999.

TURNPENNY J.R. et al. – Novel ventilation cooling system for reducing air conditioning in buildings. Part II: testing of prototype – Applied thermal engineering – 2000.

VINEET VEET T. et BUDDHI D. – PCM thermal storage in building: a state of art – Renewable et sustainable, energy reviews – 2005.

VENSTERMANS J. – Des enduits pour une climatisation douce – Revue d'information générale du Centre scientifique et technique de la construction – N° 3/2010 – 2010.

YINPING Z. et al. – Application of latent heat thermal energy storage in buildings: state-of-the-art and outlook – Building and Environment – 2006.

ZALBA B. et al. - Free-cooling of buildings with phase change materials – Refrigeration – 2004.

www.industrie.gouv.fr (visité le 14/04/2011)

## XI – Annexes

**Annexe 1 : Quelques Informations sur les fabricants et les fournisseurs de MCP**

**Annexe 2 : Analyse fonctionnelle de différentes situations de vie du système**

**Annexe 3 : Caractéristiques du RT21 et RT 28 HC**

**Annexe 1**

Quelques fabricants et les commerciaux de MCP

* RUBITHERM GmtH en Allemagne (http://www.rubitherm.de/).

* Dörken GmbH & Co. KG en Allemagne (http://www.doerken.de/).

* Climator AN en Suisse (http://www.climator.com/).

* TEAP en Australie (http://www.teappcm.com/).

* CRISTOPIA Systèmes Energétiques en France (http://www.cristopia.de/).

* Mitsubishi Chemical au Japon.

* BASF en Allemagne (http://www.basf.com/).

* Base de données du programme ECES (Energy conservation throuhg Energy Storage) de l'AIE (Agence internationale de l'Energie) : htt://www.iea-eces.org/homepage.html.

* www.pcmenergy.com

* www.xpair.com

* www.bine.info

* www.garantie-de-performance.ch

* www.techniques-ingénieur.fr

* www.ifen.fr

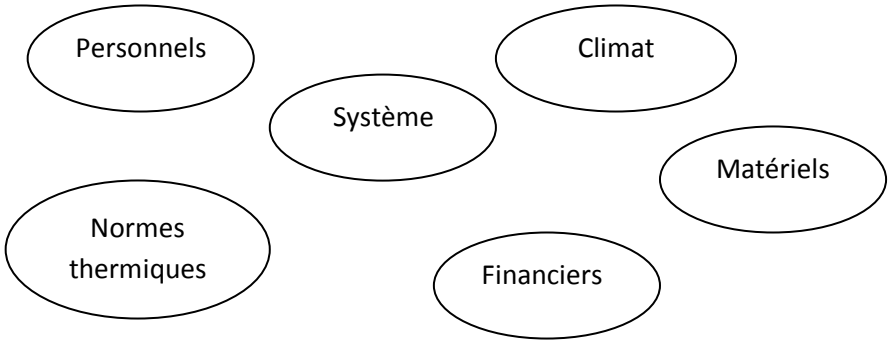
* www.cenerg.ensmp.fr

* www.ctsb.fr

**Annexe 2**

**Analyse fonctionnelle de différentes situations de vie du système**

1. Situation de vie : Conception et Fabrication




Fonction de service (FS1):

FS1 : utiliser les matériaux que les techniciens savent manier selon leurs compétences. Tenir compte de la dilatation des MCP lors du changement de phase.

Fonctions de contraintes (FC21):

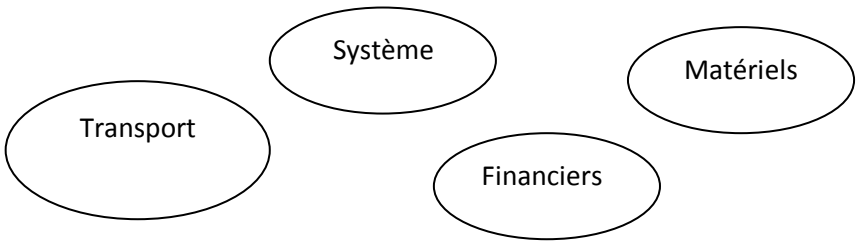
FC211 : satisfaire aux conditions financières ;

FC212 : intégrer les matériaux qui améliorent les échanges thermiques ;

FC213 : satisfaire les normes thermiques françaises ;

FC214 : faciliter le travail des fabricants.

2. Situation de vie : Transport




Fonction de service (FS2):

FS2 : Permettre le transport des différentes pièces du système.

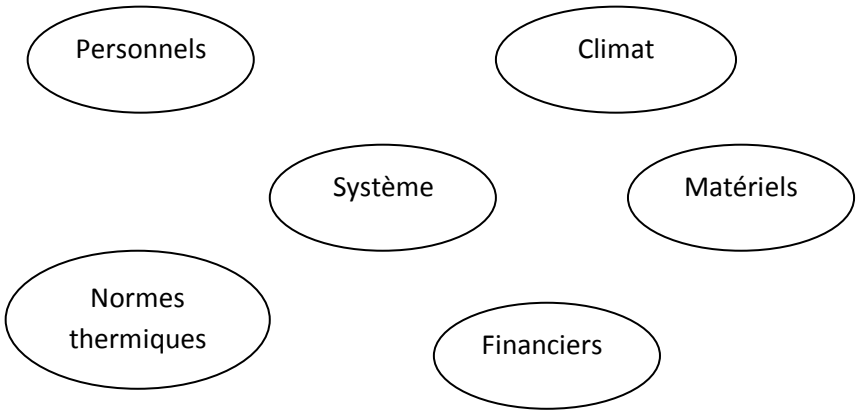
Fonctions de contraintes (FC22):

FC221 : assurer une installation facile ;

FC222 : s'adapter à l'environnement ;

FC223 : faciliter le transport.

Situation de vie : Montage – Assemblage du système




Fonction de service (FS3):

FS31 : Faciliter le montage des pièces ;

FS32 : Faciliter le remplissage des MCP dans les échangeurs ;

FS33 : Permettre la dilatation des MCP.FS1

Fonctions de contraintes (FC23) :

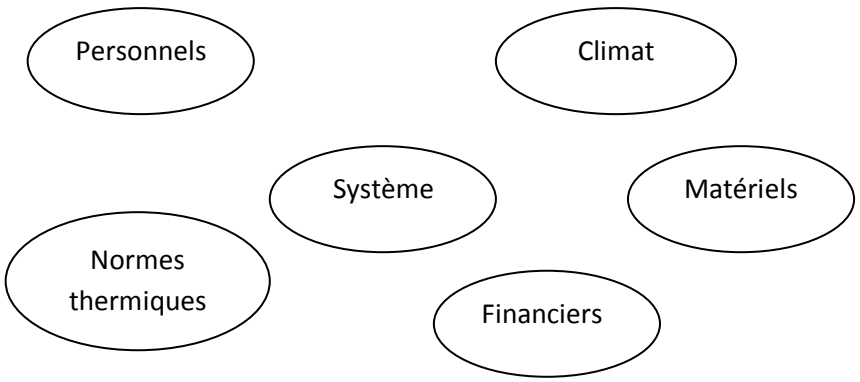
FC231 : faciliter le montage des différentes pièces ;

FC232 : faciliter le travail du personnel ;

FC233 : faciliter la circulation de l'air entre les tubes contenant les MCP ;

FC234 : intégration du système dans la maison Napévomo.

3. Situation de vie : fonctionnement le jour




Fonction de service (FS4):

Faciliter la fusion des MCP ;

Rafraîchir les bâtiments.

Fonctions de contraintes :

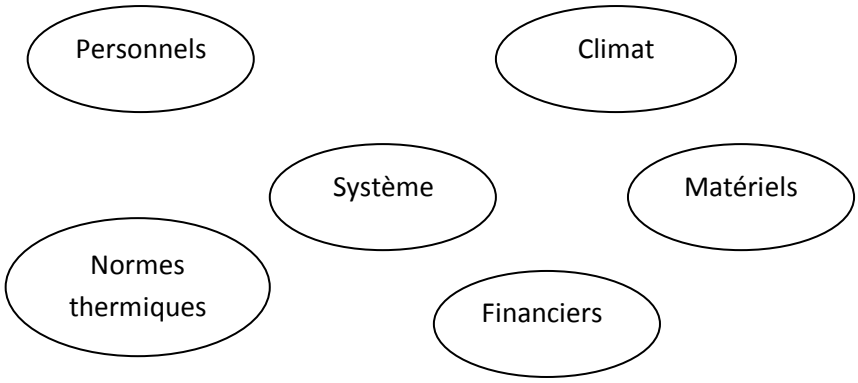
FC241 : fonctionner le jour ;

FC242 : durer de fonctionnement 24 heures au minimum ;

FC243 : avoir une bonne étanchéité entre les MCP et l'air ;

FC244 : $\Delta T_{E-S} \leq 2°C$.

4. Situation de vie : fonctionnement la nuit




Fonction de service (FS5):

Faciliter la solidification des MCP ;

Faciliter la circulation de l'air dans les bâtiments.

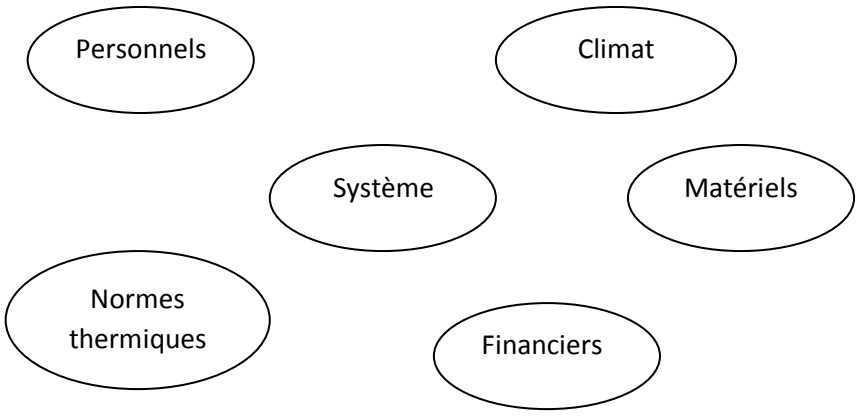
Fonctions de contraintes :

FC251 : fonctionner la nuit ;

FC252 : assurer la circulation de l'air dans deux circuits ;

FC253 : avoir une bonne étanchéité entre les MCP et l'air.

5. Situation de vie : Réglage



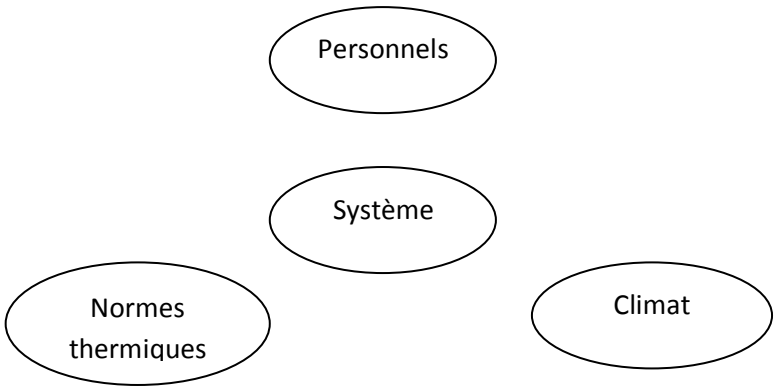

Fonction de service (FS6):

FS1 : Permettre le réglage des débits d'air.

Fonction de contrainte :

FC261 : faciliter le réglage des débits d'air.

6. Situation de vie : Agression émanant de l'environnement



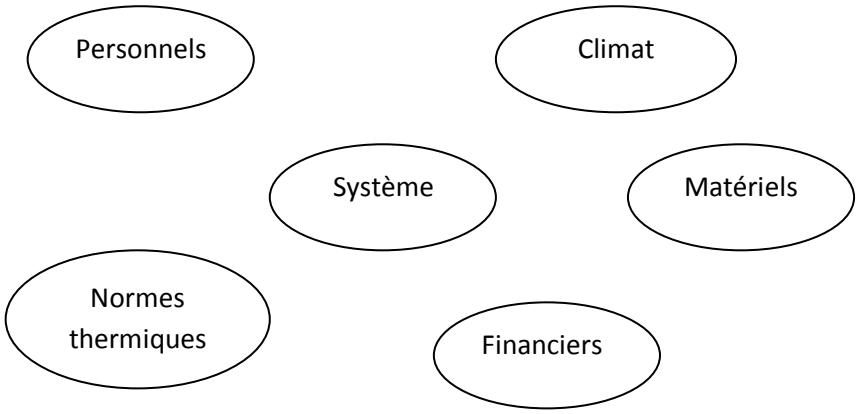

Fonction de service (FS7):

Agressions émanant de l'environnement.

Fonctions de contrainte :

FC271 : protéger le système du milieu extérieur.

7. Situation de vie : Maintenance et réparation



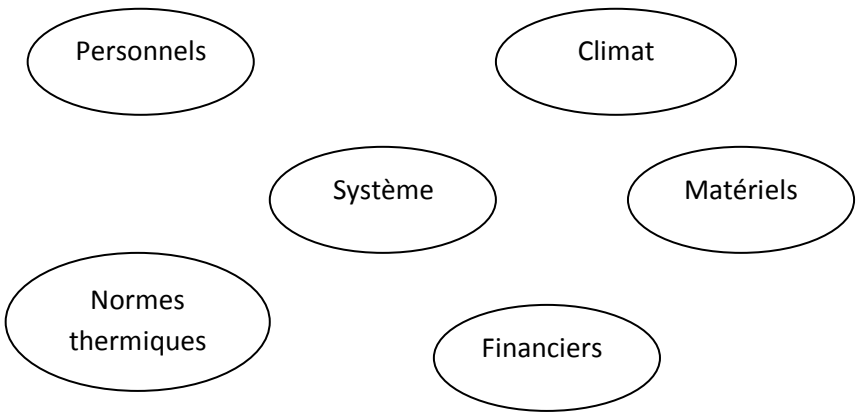

Fonction de service (FS8):

Permettre la maintenance et l'entretien de l'échangeur.

Fonctions de contrainte :

FC281 : atteindre les différentes zones de l'échangeur.

8. Situation de vie : démontage du système




Fonction de service :

FS1 : faciliter le démontage des pièces.

Fonctions de contraintes :

FC291 : protéger le système du milieu extérieur.

**Annexe 3**

Les caractéristiques du RT 21 et RT 28 HC

**Data Sheet**

# *RUBITHERM®* RT 21

(before: RT 20)

| | | Typical Values |
|---|---|---|
| Melting area | °C | 18 - 23<br>typical being: 21°C |
| Congealing area | °C | 22 - 19<br>typical being: 22°C |
| Heat storage capacity<br>temperature range 15°C to 30°C | kJ/kg | 134 |
| Density solid<br>at 15°C | kg/l | 0.88 |
| Density liquid<br>at 25°C | kg/l | 0.77 |
| Volume expansion<br>in phase change range | % | 14 |
| Heat conductivity | W/(m*K) | 0.2 |
| Kin. Viscosity<br>at 50°C | mm²/s | 25.71 |
| Flash point (PCM) | °C | 154 |
| corrosion | | chemically inert with respect to most materials |
| water hazard | | Water hazard class ( WGK ) 1 |

Version: 20.08.2009

**Preliminary Data Sheet**

# *RUBITHERM®* RT 28 HC

RUBITHERM
PHASE CHANGE MATERIAL

| | | Typical Values |
|---|---|---|
| Melting area | °C | 27 - 28<br>typical being: 28°C |
| Congealing area | °C | 28 - 27<br>typical being: 27°C |
| Heat storage capacity<br>temperature range °C to °C | kJ/kg | 245 |
| Density solid<br>at 15°C | kg/l | ca. 0.88 |
| Density liquid<br>at 40°C | kg/l | 0.768 |
| Volume expansion<br>in phase change range | % | ca. 14 |
| Heat conductivity | W/(m*K) | 0.2 |
| Kin. Viscosity<br>at 40°C | mPas | 3.1 |
| Flash point (PCM) | °C | 165 |
| corrosion | | chemically inert with respect to most materials |
| water hazard | | No water hazard classification; reg.-no.: 268 |

Version 2008.2009

**Contribution au stockage d'énergie thermique en bâtiment : développement d'un système actif à matériaux à changement de phase**

Résumé :
L'objectif de nos travaux de thèse est de concevoir, dimensionner et fabriquer un système actif à matériaux à changement de phase (MCP) pour le rafraîchissement et réchauffement de la maison Napévomo en région Aquitaine, ce dernier participant au concours Solar Décathlon (SDE2010).
L'approche proposé a pour but de fournir au lecteur suffisamment de connaissant en stockage thermique à base de MCP pour entreprendre la conception d'un système de rafraîchissement et de réchauffement d'un bâtiment passif.
La démarche utilisée consisté dans un premier temps à faire l'état de l'art des systèmes de stockage thermique à base de MCP et à établir un cahier des Charges du système à concevoir. Ces données ont amèné à proposer un modèle de calcul stationnaire basé sur une approche NUT-ε moyennant la caractérisation préalable des MCP pour dimensionner et concevoir le système. Le dimensionnement étant validé en fonction des pertes de charge et le COP (coefficient de performance). Le système est fabriqué à l'échelle 1. Il est composé de quatre échangeurs Air-MCP. Chaque échangeur renferme un amas contenant de MCP. Ils sont disposés en quinconces sur des colonnes de petits tubes. Un ensemble de dispositifs expérimentaux améliorent la conductivité des MCP ainsi que l'échange thermique entre le système et son environnement.
Les essais réalisés sur l'un des échangeurs montrent des résultats encourageants. Ce dernier rafraîchit l'air en 7-8 heures et il permet de régénérer les MCP en 6 heures en moyenne. Lors du concours Solar Décathlon (SDE2010), le système installé dans la maison Napévomo a montré sa capacité à assurer le rafraîchissement de l'air ambiant durant les 6 jours de la démonstration.

Mots clés : Matériaux à Changement de Phase (MCP) – stockage d'énergie thermique – échangeur Air/MCP – bâtiment – rafraîchissement – réchauffement.

**Contribution to the thermal energy storage in building : development of an active system with materials with change of phase**

Abstract:

The aim of our thesis work is to design size and manufacture an active system to phase change materials (PCM) for cooling and warming the house Napévomo located in Aquitaine, the latter participating in the Solar Decathlon competition (SDE2010). The approach proposed is intended to provide the reader with enough knowledge in thermal storage based on PCM to tockle the design of a cooling and heating system in passive building. The approach started by a state of the art of thermal storage systems based on PCM and determines the design requirements. These data leads us to developed a numerical model based on a static approach NUT-ε through the PCM characterization determine the main dimensioning elements of the system. The design is validated according to the energy loss of the system and it performance coefficient. The system has been manufactured in full size. It consists in four heat exchanger containing the PCM. Each heat exchanger is composed by exchanger a cluster of PCM. They are arranged in staggered rows on columns of tubes. A set of experimental devices has been made to observe the improvement of the heat exchange conductivity between the environment and the heat exchanger containing the PCM. The tests performed on one of the exchangers show encouraging results. Indeed, it enables to cool down in 7-8 hours and to regenerate the PCM during of 6 hours. At the Solar Decathlon (SDE2010), the developed system has proved to be efficient in cooling down the ambient air during the 6 days of the demonstration.

Keywords: Phase change materials (PCM) - thermal energy storage - exchanger Air / PCM – building - refresh -warming

