

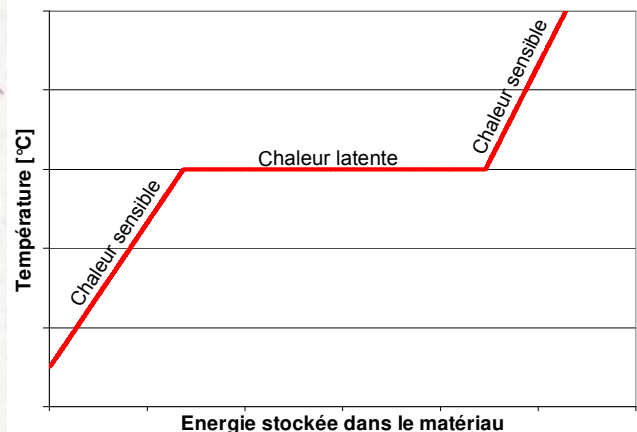
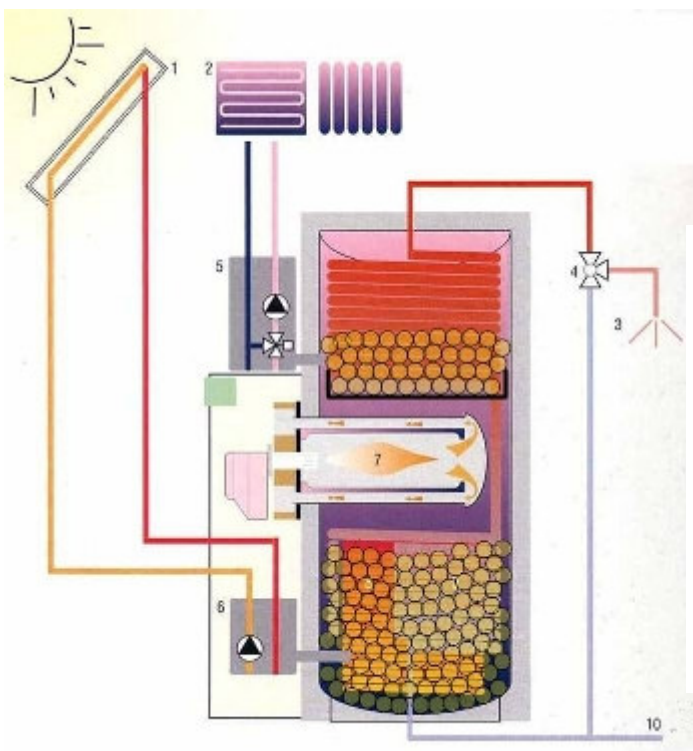
Rapport final 2006, 16 février 2007

# CoSyPCM

## Combi-Systeme avec

### Matériaux à Changement de Phase

|                                  |   |
|----------------------------------|---|
| Auteur et coauteurs              | S. Citherlet et J. Bony   |
| Institution mandatée             | Ecole d'Ingénierie et de Gestion du Canton de Vaud (HEIG-VD/LESBAT) |
| Adresse                          | Rte de Cheseaux 1   |
| Téléphone, e-mail, site Internet | Tél.: 024 / 557 63 54<br>stephane.citherlet @heig-vd.ch             |
| N° projet / n° contrat OFEN      | 12536   |
| Durée prévue du projet (de - à)  | Octobre 2003 à décembre 2006  |



## Table des matières

|  |           |
|--|-----------|
| <b>RÉSUMÉ</b> .....  | <b>4</b>  |
| <b>ABSTRACT</b> .....  | <b>5</b>  |
| <b>ZUSAMMENFASSUNG</b> .....   | <b>6</b>  |
| <b>1 INTRODUCTION</b> .....  | <b>7</b>  |
| <b>2 LES MATÉRIAUX À CHANGEMENT DE PHASE</b> .....                             | <b>8</b>  |
| 2.1 STOCKAGE THERMIQUE PAR CHALEUR SENSIBLE .....                              | 8         |
| 2.2 STOCKAGE THERMIQUE PAR CHALEUR LATENTE .....                               | 8         |
| 2.3 L'HYSTÉRÉSIS .....   | 10        |
| 2.4 LA SURFUSION.....  | 10        |
| 2.5 CLASSIFICATION ET CHOIX DES MATÉRIAUX .....                                | 11        |
| <b>3 MODÈLE NUMÉRIQUE</b> .....  | <b>13</b> |
| 3.1 DISCRÉTISATION DU PCM.....   | 15        |
| 3.2 RÉOLUTION NUMÉRIQUE DES ÉQUATIONS.....                                     | 16        |
| 3.3 CONDUCTION THERMIQUE DANS LE PCM À L'ÉTAT SOLIDE OU LIQUIDE.....           | 20        |
| 3.4 CONVECTION ENTRE L'EAU ET LE PCM .....                                     | 20        |
| 3.5 HYSTÉRÉSIS .....   | 22        |
| 3.6 SURFUSION .....  | 22        |
| 3.7 RÉDUCTION DU TEMPS DE CALCULS.....   | 24        |
| <b>4 EXPÉRIMENTATION</b> .....   | <b>27</b> |
| 4.1 RÉCIPIENT CONTENANT LE PCM.....  | 27        |
| 4.2 SONDES DE MESURE DE TEMPÉRATURE .....                                      | 28        |
| 4.2.1 Paraffine pure .....   | 28        |
| 4.2.2 Paraffine + copeaux d'aluminium.....                                     | 29        |
| 4.2.3 Paraffine + nid d'abeilles en aluminium.....                             | 29        |
| 4.2.4 Acétate de sodium + graphite .....                                       | 30        |
| 4.3 CUVE GRISE.....  | 32        |
| 4.4 PRINCIPE GÉNÉRAL DE MESURES.....   | 32        |
| <b>5 COMPARAISONS ENTRE SIMULATIONS ET RÉSULTATS EXPÉRIMENTAUX</b> .....       | <b>33</b> |
| 5.1 COEFFICIENT DE CONDUCTION EFFECTIF.....                                    | 34        |
| 5.1.1 Comparaison mesures vs simulations (modèle "cuve/PCM 2006") .....        | 34        |
| 5.2 COMPARAISON DU BILAN D'ÉNERGIE D'UNE CUVE.....                             | 40        |
| 5.3 LIT DE SPHÈRES.....  | 40        |
| 5.4 FORME CYLINDRIQUE.....   | 42        |
| <b>6 COMPARAISON AVEC DES MESURES RÉALISÉES PAR L'UNIVERSITÉ DE GRAZ</b> ..... | <b>43</b> |
| <b>7 MODULE DE PCM DANS LA CUVE D'ARPÈGE</b> .....                             | <b>44</b> |
| <b>8 MESURES AVEC LE BANC DE TESTS ARPÈGE</b> .....                            | <b>47</b> |
| 8.1 CONDITIONS DES TESTS ECS+CHAUFFAGE.....                                    | 48        |
| 8.2 CONDITIONS DES TESTS ECS .....   | 49        |
| 8.3 COMPARAISONS MESURES/SIMULATIONS .....                                     | 50        |
| 8.4 ANALYSE DES RÉSULTATS.....   | 52        |
| <b>9 SYNTHÈSES DES SIMULATIONS ET COMPARAISONS</b> .....                       | <b>53</b> |

|           |   |           |
|-----------|---|-----------|
| <b>10</b> | <b>SIMULATIONS ANNUELLES D'ARPÈGE</b> .....                                       | <b>54</b> |
| 10.1      | CRITÈRES DE COMPARAISONS .....  | 54        |
| 10.2      | RÉSULTATS.....  | 55        |
| <b>11</b> | <b>DIMINUTION DU VOLUME DE CUVE ET AMÉLIORATION DU TRANSFERT DE CHALEUR</b> ..... | <b>57</b> |
| <b>12</b> | <b>ANALYSE ENVIRONNEMENTALE PAR ÉCOBILAN</b> .....                                | <b>59</b> |
| 12.1      | SYSTÈME ANALYSÉ.....  | 59        |
| 12.2      | MÉTHODOLOGIE.....   | 59        |
| 12.2.1    | <i>Système Arpège</i> .....   | 60        |
| 12.2.2    | <i>Bâtiment étudié</i> .....  | 61        |
| 12.3      | RÉSULTATS.....  | 62        |
| 12.3.1    | <i>Système complet : Matériaux et Energie</i> .....                               | 63        |
| <b>13</b> | <b>CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES</b> .....  | <b>65</b> |
| <b>14</b> | <b>COLLABORATIONS</b> .....   | <b>66</b> |
| <b>15</b> | <b>PUBLICATIONS ET CONFÉRENCES</b> .....  | <b>66</b> |
| <b>16</b> | <b>REMERCIEMENTS</b> .....  | <b>67</b> |
| <b>17</b> | <b>RÉFÉRENCES</b> .....   | <b>68</b> |
| <b>18</b> | <b>ANNEXES</b> .....  | <b>69</b> |

## Résumé

Dans le cadre de la Tâche 32 de l'Agence Internationale de l'Energie (AIE), nous avons étudié l'opportunité de l'utilisation de matériaux à changement de phase (PCM) dans une installation solaire combinée (combi-système) sous la forme de modules placés dans une cuve de stockage. Le but est d'analyser le potentiel de stockage par chaleur latente dans un réservoir d'eau d'une installation solaire, pour en augmenter les performances ou pour réduire le volume du stock.

Afin de pouvoir mener à bien cette étude, les étapes suivantes ont été effectuées :

- Développement d'un modèle numérique : comme, il n'existait pas de modèle numérique fiable, nous avons développé un modèle dynamique pour simuler des modules de PCM de différentes formes. Ce modèle numérique prend en compte l'hystérésis, la surfusion ainsi que la convection interne du PCM en phase liquide. Ce modèle a été implémenté sur la base d'un modèle numérique de cuve existant du logiciel TRNSYS (Type60).
- Campagne de mesures en laboratoire : afin de valider le modèle numérique, nous avons testé différentes configurations et différents types de PCM pour vérifier la conformité entre simulations et résultats expérimentaux. Cette étape s'est focalisée sur l'évolution temporelle et spatiale de la distribution de la température dans le PCM et dans la cuve de stockage afin de valider le modèle numérique.
- Installation solaire combinée: le potentiel du PCM a été testé en utilisant une installation solaire combinée (Arpège) avec et sans PCM. Un bilan thermique a été effectué sur la base d'une utilisation pendant sept jours en continu d'Arpège pour différentes conditions (climats et soutirages). Suite à la validation du modèle numérique, des simulations annuelles ont été effectuées.
- Impacts environnementaux : une analyse du cycle de vie de cette installation solaire combinée avec et sans PCM a été effectuée. Cette analyse prend en considération les matériaux de l'installation Arpège, le PCM et son contenant ainsi que l'énergie d'appoint utilisée.

Le présent rapport décrit la méthodologie utilisée et les résultats obtenus lors de l'analyse du potentiel du stockage de chaleur par chaleur latente. L'utilisation de ces matériaux devrait permettre de réduire la taille du stock (densité de chaleur plus grande) et d'améliorer l'efficacité de l'installation solaire, car les PCM permettent d'obtenir des températures de fluides plus basses qu'une installation solaire traditionnelle.

## Abstract

As part of the task 32 of the International Energy Agency (IEA), we studied the potential of using Phase Change Material (PCM) in a solar combi-system in the form of modules placed in a storage tank. The goal was to analyze the potential of latent heat storage in a water tank of a solar installation, in order to increase the performances or to reduce the storage volume.

This report describes the methodology used and the results obtained during the analysis of the heat storage potential by latent heat. The following stages were carried out:

- **Development of a simulation model:** As a reliable numerical model didn't exist, we developed a dynamic model to simulate PCM modules of various PCM types and shapes. This simulation model takes into account the hysteresis, the subcooling as well as the internal convection of the PCM in a liquid phase. This model was implemented in an existing TRNSYS Type(60).
- **Measurement in laboratory:** In order to validate the digital model, we tested various configurations and different types of PCM to check the conformity between experimental simulations and results. This step was focused on the temporal and spatial evolution of the temperature distribution in the PCM and in the storage tank in order to validate the numerical model.
- **Solar combi-system:** The PCM potential was tested by using a solar combi-system (Arpège) with and without PCM. An energy balance was carried out on the basis of a seven days uninterrupted use of Arpège in various conditions (climates and domestic hot water draw off). Following the validation of the numerical model, annual simulations were made.
- **Environmental impacts:** A life cycle analysis of this solar combi-system with and without PCM was carried out. This analysis takes into account materials of the Arpège installation, the PCM and its container, as well as auxiliary energy used.

## Zusammenfassung

Im Rahmen der Task 32 der Internationalen Energieagentur (IEA) haben wir die Nutzungsmöglichkeiten von Latentwärmespeicher-Material (PCM "Phase Change Material") in einem Solar-Kombisystem untersucht, anhand von Modulen, welche in einem Speicher untergebracht wurden. Wir wollten das Lagerungspotential latenter Wärme in einem Wasserspeicher einer Solaranlage analysieren, um dadurch die Leistungen zu erhöhen oder das Lagervolumen zu reduzieren.

Der vorliegende Bericht beschreibt die verwendete Methodik und die Ergebnisse, welche bei der Analyse des Wärmespeicherungspotentials durch latente Hitze erzielt wurden. Um diese Studie durchzuführen, haben wir folgende Untersuchungen gemacht :

- Entwicklung eines digitalen Modells : Da es kein zuverlässiges numerisches Modell gab, haben wir ein dynamisches Modell entwickelt, um verschiedene PCM-Modulformen zu simulieren. Dieses Modell berücksichtigt die Hysterese, die Unterkühlung sowie die innere Konvektion des PCM's in flüssiger Phase. Dieses Modell ist auf der Basis eines vorhandenen TRNSYS Type (60) implementiert worden.
- Messmassnahmen im Labor : Um das numerische Modell zu validieren, haben wir verschiedene Konfigurationen und PCM-Typen getestet und die Übereinstimmung zwischen experimentellen Simulationen und deren Ergebnissen geprüft. Diese Etappe hat sich auf die zeitliche und räumliche Entwicklung der Temperaturverteilung im PCM und im Speicher fokussiert, um so das Modell zu validieren.
- Solar-Kombisystem : Das PCM-Potential wurde durch ein Solar-Kombisystem (Arpège) mit und ohne PCM getestet. Eine Energiebilanz ist mittels einer siebentägigen, ununterbrochenen Benutzung von Arpège unter verschiedenen Bedingungen (Klima und Warmwasserbezug) durchgeführt worden. Nach der Validation des Modells sind ganzjährige Simulationen durchgeführt worden.
- Umweltauswirkungen : Eine Analyse des Lebenszyklusses dieses Solar-Kombisystems, das mit oder ohne PCM kombiniert wurde, ist durchgeführt worden. Diese Analyse berücksichtigt die Materialien der Arpège-Installation, PCM mit Behälter, sowie die benutzte Zusatzenergie.

# 1 Introduction

À la fin de l'année 2003, une nouvelle Tâche de l'Agence Internationale de l'Energie (AIE) a été définie dans le cadre du programme Solar Heating and Cooling. Cette Tâche 32, intitulée *Advanced Storage Concepts for Solar and Low Energy Buildings* (concepts de stockages avancés pour bâtiments solaires à basse consommation thermique), a pour objectifs de :

- Rechercher des solutions pour systèmes de stockage de la chaleur fournissant de la chaleur ou du froid pour les bâtiments solaires à basse consommation.
- Contribuer au développement de solutions de stockage avancé pour les systèmes solaires thermiques impliquant une haute fraction solaire de l'énergie utilisée dans le bâtiment.
- Proposer des solutions de stockage d'énergie pour d'autres technologies que solaires, par exemple, pour le chauffage ou la climatisation (pompe à chaleur, chaudière).

La Tâche 32 comporte 4 sous-tâches :

- La sous-tâche A regroupe le travail réalisé sur des critères de comparaisons de performance, de faisabilité et d'aspects économiques. De plus, les partenaires de la Tâche 32 ont compilé leurs connaissances relatives aux différents domaines étudiés dans un ouvrage intitulé "*Thermal energy storage for solar and low energy buildings*" dont l'une des parties est dédiée aux PCM [1].
- La sous-tâche B concerne le stockage physicochimique comme l'ab- ou l'adsorption.
- La sous-tâche C est liée à l'utilisation des matériaux à changement de phase (PCM) pour le stockage thermique sous forme de chaleur latente. Différentes approches sont abordées, le stockage à court terme ou à long terme (saisonnier).
- La sous-tâche D étudie les possibilités d'amélioration des stocks en eau en utilisant entre autres des nouveaux matériaux pour l'isolation, en optimisant la charge ou la décharge thermique...

Les personnes intéressées trouveront plus d'informations sur la Tâche 32 de l'AIE sur le site:

<http://www.iea-shc.org/>

Parmi ces différentes approches, la possibilité d'utiliser des matériaux à changement de phase est étudiée dans le présent rapport. L'utilisation de ces matériaux a pour avantages de réduire la taille du stock (densité de chaleur plus grande) et d'améliorer l'efficacité de l'installation solaire. En effet, les PCM permettent d'obtenir des températures dans le circuit solaire plus basses que pour une installation solaire traditionnelle. Notre projet consiste à évaluer les performances d'un combi-système solaire contenant des éléments fixes remplis avec des PCM. Dans ce but, nous avons développé un modèle numérique permettant de simuler une cuve d'eau remplie de modules de PCM. Nous avons également développé un banc de tests permettant de comparer les performances de différentes configurations d'une même installation solaire.

## 2 Les matériaux à changement de phase

### 2.1 STOCKAGE THERMIQUE PAR CHALEUR SENSIBLE

Le stockage à chaleur sensible est de loin la manière la plus courante d'emmagasiner l'énergie thermique, comme par exemple l'eau d'une cuve servant à stocker l'énergie solaire produite par des capteurs thermiques. Le stockage sensible est produit par un apport thermique qui augmente la température du milieu récepteur "monophasé" (liquide ou solide). Le déstockage ou soutirage de chaleur entraîne une diminution de température de ce même milieu. L'équation ci-dessous représente cette chaleur sensible :

$$\text{Chaleur stockée: } Q = m \cdot c \cdot \Delta T \text{ [J]}$$

Avec :  $m$  = masse du matériau utilisé [kg]

$c$  = chaleur massique du matériau utilisé [J/(kg.K)]

$\Delta T$  = différence entre températures moyennes finale et initiale du stock [K]

De par sa capacité de stocker l'énergie, sa profusion et sa non-toxicité, l'eau est le matériau le plus utilisé pour stocker l'énergie en chaleur sensible.

### 2.2 STOCKAGE THERMIQUE PAR CHALEUR LATENTE

Dans le cas du stockage par chaleur latente, l'énergie emmagasinée entraîne une variation de température et un changement de phase du matériau considéré dans le sens solide → liquide ou liquide → gaz. La restitution de l'énergie entraîne le changement de phase inverse. En règle générale, le changement de phase liquide/gaz n'est pas choisi, afin d'éviter le changement de volume important provoqué lors du passage à la phase gazeuse.

La chaleur absorbée ou restituée lors d'un changement de phase est donnée par l'équation ci-dessous :

$$\text{Chaleur stockée: } Q = m \cdot L \text{ [J]}$$

Avec :  $m$  = masse du matériau utilisé [kg]

$L$  = capacité de stockage du matériau utilisé [J/kg]

Dans la pratique, il peut arriver que la chaleur sensible et la chaleur latente interviennent successivement dans des processus thermiques. Par exemple, si la température initiale  $T_1$  d'un stock est inférieure à la température de fusion  $T_f$  d'un matériau et où la température finale  $T_2$  est supérieure à  $T_f$ , le stockage de chaleur aura lieu sous forme sensible et sous forme latente, comme le montre la

Figure 1.

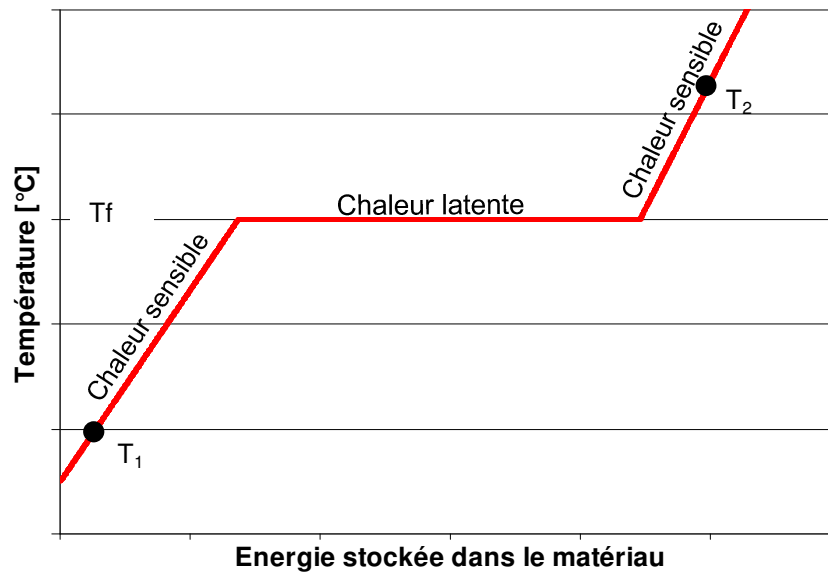


Figure 1 : Stockage d'énergie thermique par chaleurs sensible et latente.

Dans ce cas on a :

$$\text{Chaleur stockée: } Q = m \cdot \left[ \int_{T_1}^{T_f} c_s \cdot dT + L_f + \int_{T_f}^{T_2} c_l \cdot dT \right] \text{ [J]}$$

Avec:  $m$  = masse de matériau utilisé [kg]

$c_s$  = chaleur massique spécifique de phase solide du matériau utilisé [J/(kg.K)]

$c_l$  = chaleur massique spécifique de phase liquide du matériau utilisé [J/(kg.K)]

$L_f$  = capacité de stockage du matériau utilisé [J/kg]

$dT$  = différence entre températures moyennes finale et initiale du stock [K]

$T_f$  = température de fusion du matériau à changement de phase [°C]

$T_1$  = température initiale du stock [°C]

$T_2$  = température finale du stock [°C]

La chaleur latente de changement de phase de certains corps composés est très élevée, comme le montre le Tableau 1. Cette propriété de l'énergie latente devrait permettre une diminution du volume de stockage par rapport à la méthode de chaleur sensible.

| Matériau                     | Energie latente | Cp            | Rho                   |
|------------------------------|-----------------|---------------|-----------------------|
|                              | L [MJ/kg]       | [J/(kg.K)]    | [kg/dm <sup>3</sup> ] |
| Eau                          | 333             | 4180          | 0.998                 |
| Paraffine                    | 180             | 1800 (solide) | 0.9 (solide)          |
| Acétate de sodium + graphite | 150 à 58 [°C]   | 2000          | 1.3 à 1.4             |

Tableau 1 : Différentes caractéristiques pour les matériaux utilisés dans cette étude.

### 2.3 L'HYSTÉRÉSIS

Dans certaines conditions, le changement de phase n'est pas symétrique. Pour certains matériaux, les températures de transformations d'une phase à l'autre diffèrent selon que l'on augmente la température ou que l'on refroidisse la température. Ce phénomène, appelé hystérésis, provient du retard de la cristallisation au cours du refroidissement en phase liquide. Par contre, lorsque la cristallisation apparaît, la température reste stable durant le reste de la transformation.

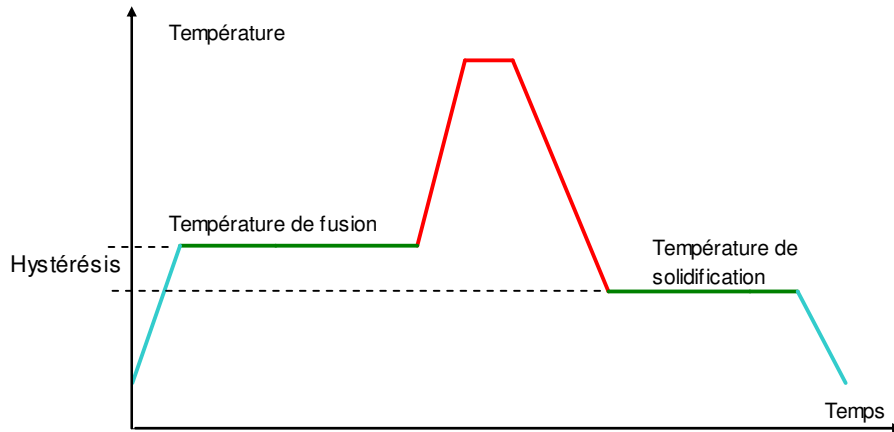


Figure 2 : Phénomène de surfusion lors du refroidissement.

Ce phénomène n'est pas recherché pour le stockage d'énergie. En effet, il diminue le niveau de température utilisable.

### 2.4 LA SURFUSION

Dans certaines conditions, il peut apparaître un retard de la cristallisation au cours du refroidissement d'un liquide ; le liquide ne cristallise pas à la température d'équilibre liquide – solide mais à une température plus basse. Ce phénomène est appelé la surfusion.

Dès que la cristallisation apparaît, la température remonte à la température d'équilibre du changement de phase durant le reste de la transformation.

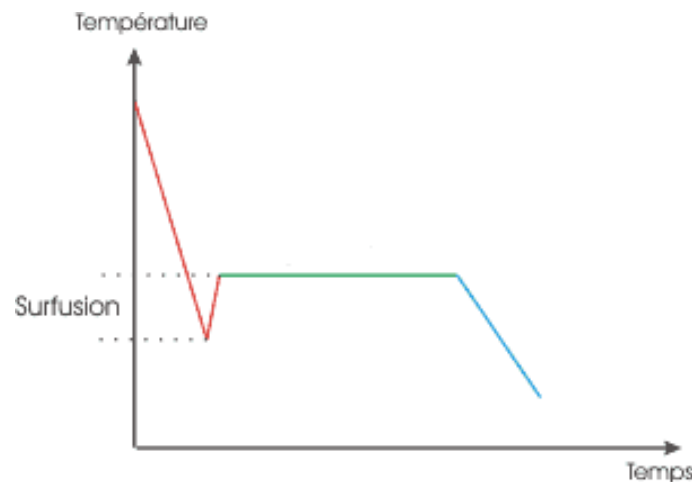


Figure 3 : Phénomène de surfusion lors du refroidissement.

Certains matériaux possèdent cette caractéristique alors que d'autres en sont exempts. Selon l'utilisation, ce phénomène est recherché ou non. Pour le stockage et déstockage thermique à court terme, on évitera la surfusion comme dans notre cas. Par contre, pour le stockage à long terme (à température ambiante), cette surfusion sera recherchée permettant ainsi de garder l'énergie sous forme latente sans pertes thermiques. La restitution de cette énergie, se fera uniquement lors de l'activation de la cristallisation dégageant ainsi de la chaleur (remontée en température). Certaines applications existent comme un petit coussinet que l'on active manuellement par une action mécanique pour se réchauffer (Figure 4).

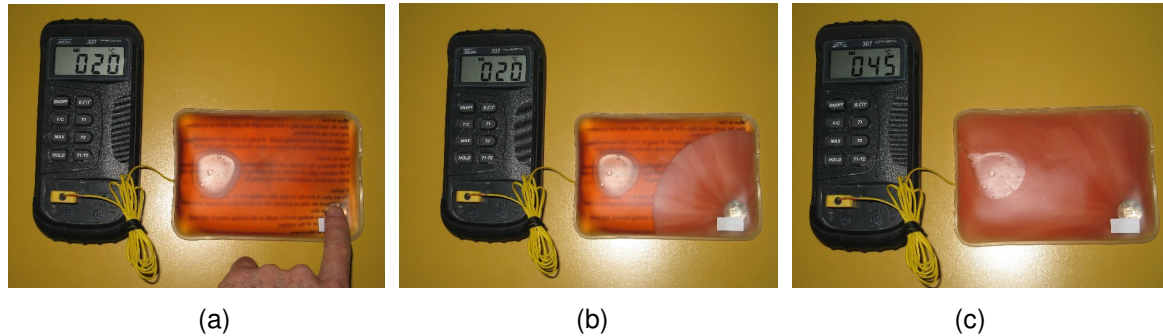


Figure 4 : Cristallisation après la surfusion.

La Figure 4a illustre l'activation manuelle à l'aide d'une pastille métallique située dans le coussinet même. A la température de 20 [°C], le matériau est en état de surfusion. Le début de cristallisation est visible à la Figure 4b où la température indiquée est toujours de 20 [°C] au point de mesure. Environ trois secondes séparent ces deux premières photos. Une fois la cristallisation complète (Figure 4c), la température atteinte est de 45 [°C].

## 2.5 CLASSIFICATION ET CHOIX DES MATÉRIAUX

Il existe plusieurs types de matériaux pour le stockage d'énergie. La Figure 5 illustre la gamme de ces matériaux. Dans notre cas, les PCM (latent heat) sont séparés en deux grands groupes. Les organiques (les paraffines et les acides gras) et les inorganiques (les hydrates de sels).

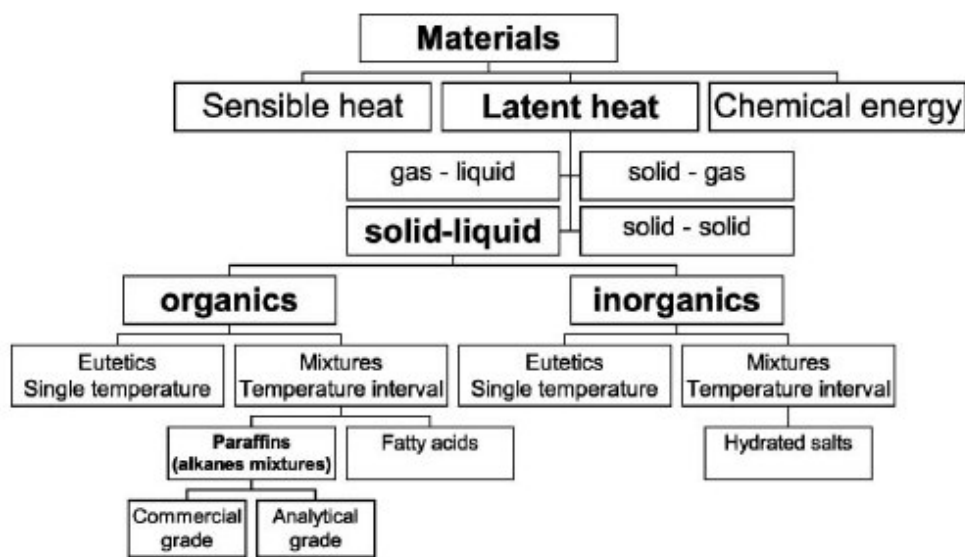


Figure 5 : Classification des matériaux pour le stockage d'énergie thermique [3].

Le tableau ci-dessous résume les principaux avantages et inconvénients pour chaque type de matériau.

|                      | <b>Paraffine</b>   | <b>Acide gras</b>   | <b>Hydrate de sels</b>   |
|----------------------|--|---|--|
| <b>Avantages</b>     | <ul style="list-style-type: none"> <li>-Non corrosif</li> <li>-Pas ou peu de surfusion</li> <li>-Bonne stabilité dans le temps</li> </ul>  | <ul style="list-style-type: none"> <li>-Non corrosif</li> <li>-Pas ou peu de surfusion</li> <li>-Bonne stabilité dans le temps</li> <li>-Matériau naturel</li> </ul>  | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Prix plus faible</li> <li>- Chaleur latente élevée (250 à 400 kJ/m<sup>3</sup>)</li> <li>- Meilleure conductivité thermique (0.5 à 0.7 W/m.K)</li> <li>- Chaleur spécifique massique plus élevée</li> <li>- Masse plus élevée (1,3 à 2 kg/m<sup>3</sup>)</li> </ul> |
| <b>Inconvénients</b> | <ul style="list-style-type: none"> <li>-Chaleur latente peu élevée (150 à 180 kJ/m<sup>3</sup>)</li> <li>-Chaleur spécifique massique faible</li> <li>-Faible conductivité thermique (0.15 à 0.35 W/m.K)</li> <li>-Masse plus faible (0,7 à 1,2 kg/m<sup>3</sup>)</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>-Chaleur latente peu élevée (150 à 180 kJ/m<sup>3</sup>)</li> <li>-Chaleur spécifique massique faible</li> <li>-Faible conductivité thermique (≈ 0.15 W/m.K)</li> <li>-Masse plus faible (0,7 à 1,0 kg/m<sup>3</sup>)</li> <li>-Prix plus élevé que celui des paraffines et des hydrates de sel</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>-Corrosif</li> <li>-Vieillessement rapide</li> <li>-Phénomène de surfusion (15 à 30 K)</li> </ul>   |

**Tableau 2 : Avantages et inconvénients des différents types de matériaux à changement de phase.**

Les tableaux ci-dessous présentent différents moyens pour palier à ces inconvénients :

*Paraffines et acides gras*

| <b>Inconvénient</b>           | <b>Palliatif</b>                                   | <b>Conséquence</b>   |
|-------------------------------|--|----------------------|
| Faible conductivité thermique | Adjonction de particules ou de pièces conductrices | Masse de PCM moindre |

**Tableau 3 : Méthode pour diminuer les inconvénients des paraffines et acides gras.**

*Hydrates de sels*

| <b>Inconvénient</b>              | <b>Palliatif</b>                           | <b>Conséquence</b>             |
|----------------------------------|--|--------------------------------|
| Corrosion                        | Encapsulation dans des matières plastiques | Echange de chaleur plus faible |
| Vieillessement (cycle thermique) | Adjonction d'additifs                      | Baisse de la chaleur latente   |
| Surfusion                        | Adjonction d'additifs                      |                                |

**Tableau 4 : Méthode pour diminuer les inconvénients des hydrates de sels.**

Dans l'étude réalisée au sein de notre laboratoire, nous avons principalement utilisé deux types de matériaux :

- la paraffine (RT27 et RT54 de Rubitherm)
- l'acétate de sodium avec du graphite (hydrate de sels)

Les caractéristiques de ces matériaux se trouvent en annexe (A1).

### 3 Modèle numérique

Depuis plusieurs décennies, différents modèles numériques de stockage d'énergie utilisant des PCM ont été développés. Quelques uns de ces modèles ont été élaborés pour travailler avec le logiciel de simulation TRNSYS. Malheureusement, aucun n'a donné suffisamment de satisfaction pour permettre une large diffusion de ce modèle, soit par manque de temps pour tester sa fiabilité, soit par manque de flexibilité pour permettre de modéliser différentes formes de PCM.

Nous avons donc décidé, comme deux autres groupes impliqués dans la Tâche 32, de développer un modèle compatible avec TRNSYS. Dans notre cas, il a été choisi de partir du Type60 de TRNSYS qui est un modèle pour une cuve de stockage standard admettant jusqu'à 100 couches et de l'adapter pour lui permettre de tenir compte de l'utilisation des PCM.

Le Type60 standard intègre trois échangeurs de chaleur tubulaires, deux entrées/sorties directes dont une charge stratifiée possible et deux appoints. La cuve peut être considérée verticale ou horizontale. Ce modèle permet ainsi de simuler la plupart des cuves de stockage. La discrétisation verticale par couche appelée également nœud (Figure 6a) permet de définir le degré de précision des calculs qui augmentera avec l'accroissement du nombre de ces nœuds. La hauteur et les pertes thermiques de chaque couche peuvent être définies séparément. Cela permet de prendre en compte les pertes par pont de froid comme par exemple un piquage de conduite. En cas d'inversion de température, froid en haut et chaud en bas, il y a un mélange complet entre les couches considérées. La hauteur de l'entrée d'eau froide détermine donc la hauteur de la zone basse de la cuve où la température est uniforme si cette eau entrant est plus froide que celle située en bas de cuve.

La Figure 6b et l'équation (A) illustrent les différents flux de la chaleur considérés pour le bilan d'énergie dans chaque  $i^{\text{ème}}$  nœud de la cuve [6]. Il est à noter que la température est uniforme dans chacune de ces couches.

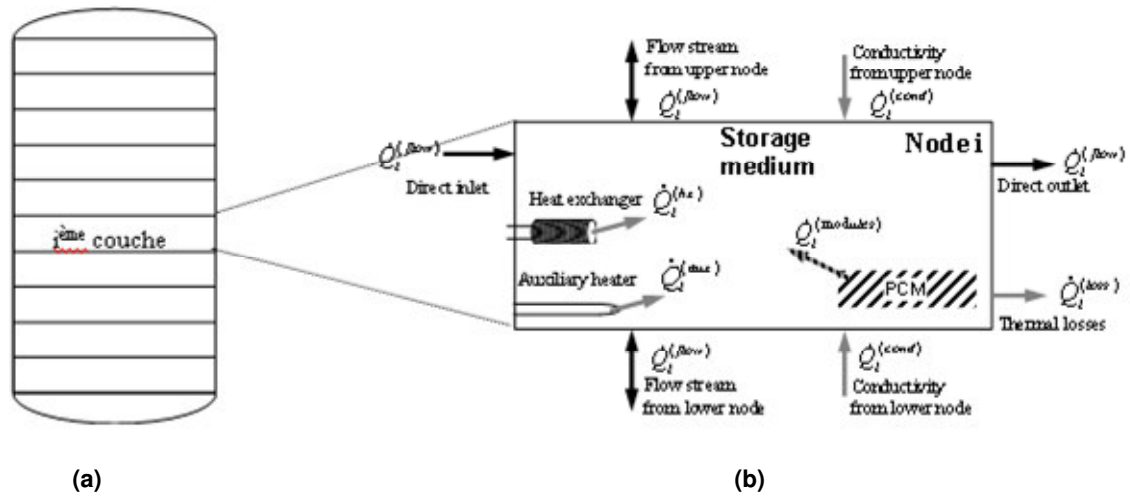


Figure 6 : Bilan d'énergie dans chacun des nœuds.

- Avec :
- $Q^{(flow)}$  = débit d'entrée ou de sortie de la couche
  - $Q^{(hx)}$  = transfert de chaleur avec un échangeur
  - $Q^{(aux)}$  = énergie d'appoint
  - $Q^{(cond)}$  = transfert de chaleur par conduction
  - $Q^{(loss)}$  = pertes thermiques
  - $Q^{(modules)}$  = transfert de chaleur entre l'eau et le PCM

$$\dot{Q}_i^{(medium)} = \dot{Q}_i^{(flow)} + \dot{Q}_i^{(hx)} + \dot{Q}_i^{(aux)} + \dot{Q}_i^{(cond)} + \dot{Q}_i^{(loss)} + \dot{Q}_i^{(modules)} \quad (A)$$

L'équation régissant le transfert de chaleur entre l'eau et le PCM se présente sous la forme suivante [7] :

$$\dot{Q}_i^{(modules)} = -N^{(modules)} \left\{ U_i A_i^{PCM} \cdot [T_i - T_i^{PCM} (h_i^{PCM})] \right\} \quad (B)$$

- Avec :
- $N^{(modules)}$  = nombre de containers de PCM
  - $U$  = coefficient de transfert de chaleur eau/PCM
  - $A$  = surface de contact eau/container
  - $T$  = température de l'eau
  - $T^{PCM}$  = température de surface du container

Le calcul de transfert de chaleur à travers le PCM utilise la méthode enthalpique, c'est-à-dire qu'il y a en premier un calcul de l'enthalpie suivi de celui de la température. On obtient une fonction  $T(h)$  continue et réversible qui est en fait une succession de 5 droites. Deux pour la chaleur sensible en phase solide ou liquide et trois droites dans la partie de changement de phase. La Figure 7 illustre cette fonction où chaque petit carré représente le découpage en 5 parties. La précision ainsi obtenue est suffisante pour les calculs.

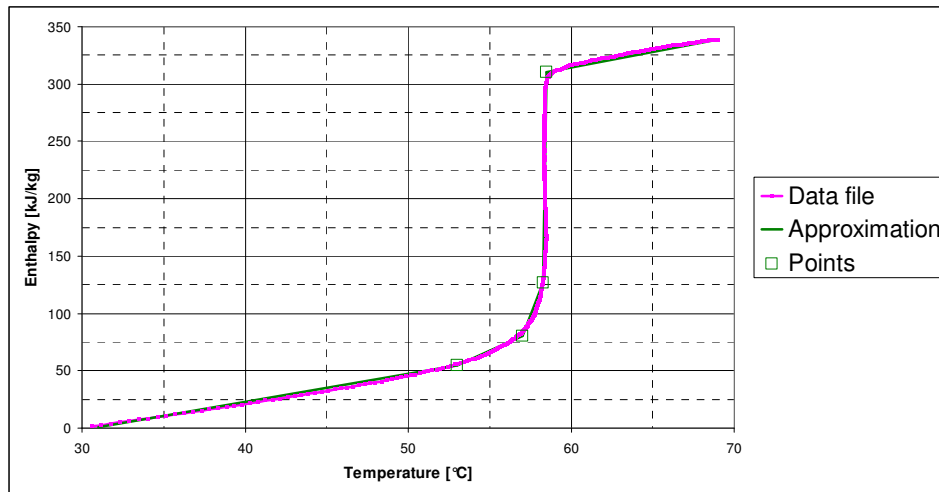


Figure 7 : Courbe de l'enthalpie en fonction de la température divisée en 5 portions de droite.

### 3.1 DISCRÉTISATION DU PCM

Le modèle de calcul interne au PCM est de type à deux dimensions. Il permet d'utiliser des éléments de PCM de formes différentes : cylindre, sphère ou plaque. Nous avons utilisé une approche du type pelure d'oignon, qui consiste à représenter un élément de PCM par une succession de couches d'épaisseur constante, et dont la forme dépend de l'objet comme le montre la Figure 8.

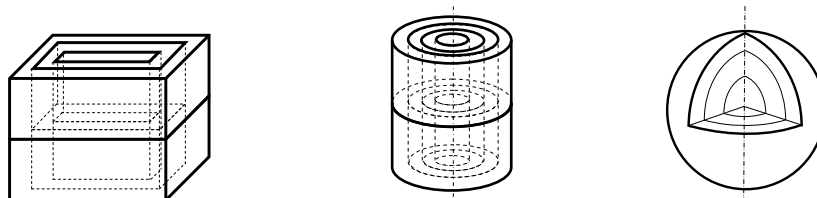


Figure 8 : Différentes formes modélisables avec pour chacune la discrétisation.

Pour chaque couche, on effectue un bilan énergétique (figure et équations ci-dessous) en supposant une température uniforme dans le volume du nœud correspondant.

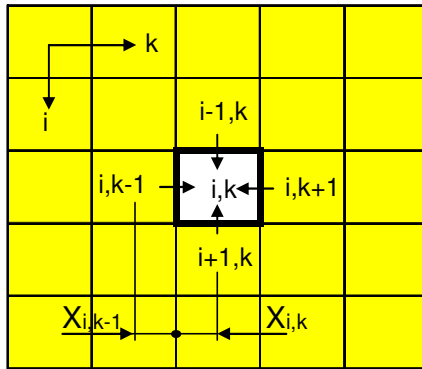


Figure 9 : maillage dans le PCM.

Bilan énergétique (changement d'enthalpie) :

$$\frac{\Delta h_{i,k}}{\Delta t} = \dot{Q}_{i,k-1 \rightarrow i,k} + \dot{Q}_{i,k+1 \rightarrow i,k} + \dot{Q}_{i-1,k \rightarrow i,k} + \dot{Q}_{i+1,k \rightarrow i,k} \quad (C)$$

Transfert de chaleur entre 2 nœuds :

$$\dot{Q}_{i,k-1 \rightarrow i,k} = \left( \frac{\lambda_{i,k}}{x_{i,k}} + \frac{\lambda_{i,k-1}}{x_{i,k-1}} \right) \cdot A_{i,k-1 \rightarrow i,k} \cdot (T_{i,k-1} - T_{i,k}) \quad (D)$$

Avec :  $i$  = axe vertical lié au découpage de la cuve

$k$  = axe horizontal du découpage du PCM

$\lambda$  = coefficient de conduction thermique

$x$  = distance entre 2 nœuds

$A$  = surface d'échange entre 2 nœuds

### 3.2 RÉSOLUTION NUMÉRIQUE DES ÉQUATIONS

La résolution numérique de ce type de calculs peut se réaliser avec une méthode soit explicite soit implicite.

A) La méthode *explicite* est simple à programmer mais est conditionnellement stable. Cela demande d'avoir une limite du pas de temps suffisamment petit afin d'éviter de diverger. La durée de la simulation devient plus importante.

B) La méthode *implicite* est plus complexe à programmer mais elle est inconditionnellement stable. Il n'y a pas de limite du pas de temps si ce n'est pour permettre une bonne précision de calculs.

Comme le temps de calculs peut être relativement long, nous avons comparé trois méthodes programmées en Visual Basic sur un tableur Excel afin d'analyser les performances de ces trois approches pour choisir la plus appropriée à ce projet :

1) *Méthode semi-implicite Gauss-Seidel*, utilisée dans les cas de phénomène non linéaire tel que le changement de phase. Il est à noter que la résolution d'équation est basée sur le principe de la méthode itérative brièvement expliqué ci-dessous :

Soit le système suivant de 3 équations à 3 inconnues :

$$\begin{cases} a_{11}x_1 + a_{12}x_2 + a_{13}x_3 = y_1 \\ a_{21}x_1 + a_{22}x_2 + a_{23}x_3 = y_2 \\ a_{31}x_1 + a_{32}x_2 + a_{33}x_3 = y_3 \end{cases}$$

On résout le système de la manière suivante :

$$\begin{cases} x_1 = \frac{y_1 - (a_{12} \cdot x_2 + a_{13} \cdot x_3)}{a_{11}} \\ x_2 = \frac{y_2 - (a_{21} \cdot x_1 + a_{23} \cdot x_3)}{a_{22}} \\ x_3 = \frac{y_3 - (a_{31} \cdot x_1 + a_{32} \cdot x_2)}{a_{33}} \end{cases}$$

On donne aux inconnues les valeurs arbitraires initiales  $x_2^0, x_3^0$ .

On porte  $x_2^0$  et  $x_3^0$  dans la 1<sup>ère</sup> équation et on obtient :  $x_1^1 = \frac{y_1 - (a_{12} \cdot x_2^0 + a_{13} \cdot x_3^0)}{a_{11}}$

Cette nouvelle valeur de  $x_1$  est portée dans la 2<sup>ème</sup> équation du système, donnant :

$$x_2^1 = \frac{y_2 - (a_{21} \cdot x_1^1 + a_{23} \cdot x_3^0)}{a_{22}}$$

De même dans la 3<sup>ème</sup> équation, on porte  $x_1^1$  et  $x_2^1$ .

$$x_3^1 = \frac{y_3 - (a_{31} \cdot x_1^1 + a_{32} \cdot x_2^1)}{a_{33}}$$

Lorsqu'une inconnue est utilisée, c'est automatiquement la plus récente valeur calculée. Ainsi, le calcul de chaque nœud au pas de temps  $n$  est réalisé avec une partie des résultats du pas  $n-1$  et du pas de temps  $n$ . La proportion de résultats au pas de temps  $n$  par rapport à ceux  $n-1$  augmente au cours de la résolution. Ceci assure en théorie une convergence des calculs rapide. Dans notre cas où le système est fortement non linéaire lors du changement de phase, un facteur de relaxation ( $kr$ ) est nécessaire et compris entre 0 et 1. Il agit sur la différence entre la valeur calculée au temps  $n$  et celle du temps  $n-1$  (équation ci-dessous).

$$x_1^{*n} = x_1^{n-1} + kr(x_1^n - x_1^{n-1})$$

2) La *Méthode explicite* simple, contrairement à la méthode précédente, calcule chaque nœud au pas de temps  $n$  avec les résultats du pas  $n-1$ . C'est une méthode simple qui demande une attention particulière au choix du pas de temps afin d'éviter une divergence des calculs. Ce pas de temps (équations (H) et (I)) se calcule en fonction des coefficients de transfert de chaleur (convectif et conductif) ainsi que la capacité thermique de chaque nœud et dépend également de la position du nœud considéré [8].

Pour un nœud en surface :  $Fo(2 + Bi) \leq 1/2$  (E)

Pour un nœud dans un matériau :  $Fo \leq 1/4$  (F)

Avec :

$$Fo = \frac{\lambda \cdot t}{\rho \cdot Cp \cdot x^2} \quad \text{et} \quad Bi = \frac{\alpha \cdot x}{\lambda} \quad (G)$$

Le pas de temps est calculé pour :

- un nœud à l'interface eau/PCM

$$t = \frac{\rho \cdot Cp \cdot x^2}{2\lambda(2 + \alpha \cdot x/\lambda)} \quad (H)$$

- un nœud dans un matériau

$$t = \frac{\rho \cdot Cp \cdot x^2}{4\lambda} \quad (I)$$

- $Fo$  = nombre de Fourier [-]
- $Bi$  = nombre de Biot [-]
- $\lambda$  = coefficient de conduction du PCM [W/(m.K)]
- $t$  = pas de temps de simulation [s]
- $\rho$  = masse volumique du PCM [kg/m<sup>3</sup>]
- $Cp$  = chaleur massique du PCM [J/(kg.K)]
- $x$  = distance entre deux nœuds [m]
- $\alpha$  = coefficient de convection entre l'eau et le PCM [W/(m<sup>2</sup>.K)]

3) *Méthode explicite double avec interpolation et moyenne*). Cette dernière permet d'augmenter le pas temps (jusqu'à 4 fois selon la variation du changement de température) par rapport à l'explicite simple et d'affiner la précision. Le principe est de calculer 2 pas de temps à la suite. A partir du 2<sup>ème</sup> pas de temps, une interpolation linéaire est appliquée pour le pas de temps précédent. Ensuite, une moyenne est calculée entre cette interpolation et la température calculée lors du 1<sup>er</sup> pas de temps. La Figure 10 illustre ce type d'approche et son intérêt principal est une précision accrue pour un même pas de temps.

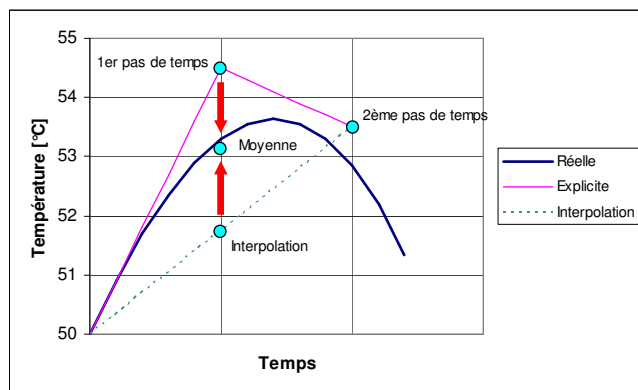


Figure 10 : Principe de la méthode explicite double.

Le Tableau 5 ci-dessous résume les différents avantages et inconvénients liés à chacune de ces méthodes.

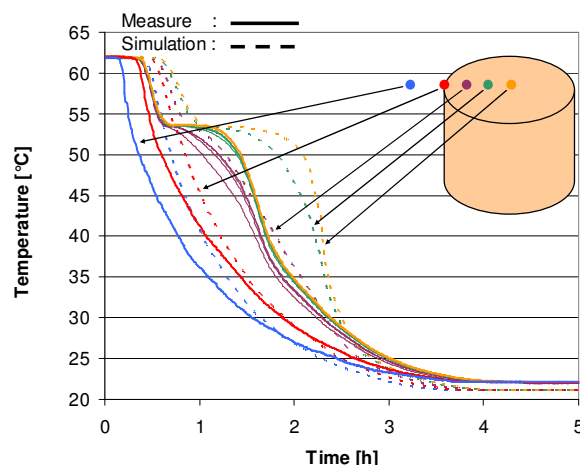
| Méthode          | Avantages  | Inconvénients   | Conclusion   |
|------------------|--|---|--|
| Explicite simple | Simple à programmer.   | Conditionnellement stable.  | Est de vitesse équivalente à la méthode double, mais elle est plus simple à programmer             |
| Explicite double | Plus rapide en théorie et plus précise que la méthode simple.  | Conditionnellement stable.  | N'est pas plus rapide en moyenne que la méthode simple mais elle est plus compliquée à programmer. |
| Implicite        | Plus rapide que les autres méthodes en dehors du changement de phase.<br>Inconditionnellement stable en théorie. | Lors du changement de phase, le facteur de relaxation doit être tellement petit que la simulation est moins rapide. | Beaucoup trop lent avec un petit facteur de relaxation et plus complexe à programmer.              |

**Tableau 5 : Avantages et inconvénients des différentes méthodes de résolutions numériques.**

Avec TRNSYS, la rapidité d'exécution est également tributaire du pourcentage de module de PCM introduit dans la cuve. En effet, le pas de temps interne du Type60 devient de plus en plus petit quand la quantité d'eau par couche diminue au point que le pas de temps lié au PCM lui-même n'est plus prépondérant. S'il y a peu de PCM dans la cuve, la méthode explicite double devient plus rapide que la méthode simple. En contrepartie, s'il y a beaucoup de PCM (à partir de 40 ou 50% en volume) la méthode explicite simple peut être plus rapide. Puisque nous désirons mettre le plus de PCM possible, et que la programmation de cette dernière méthode est plus facile nous utilisons dans le modèle de cuve uniquement la méthode explicite simple.

La faible conduction thermique dans les PCM implique un transfert de chaleur fortement influencé par les boucles convectives à l'intérieur même de ces matériaux. Dans une installation solaire pour le chauffage et l'eau chaude sanitaire, nous avons besoin d'une forte puissance pour la fourniture de l'énergie. Il est donc indispensable d'augmenter grandement le transfert de chaleur entre le PCM et le fluide caloporteur (généralement de l'eau).

L'amélioration du transfert thermique peut être réalisée de différentes manières. Soit en diminuant fortement la taille du module de PCM (bille de petit diamètre, jusqu'à 5 mm), surface de contact importante vis-à-vis de l'épaisseur. Soit en augmentant la conduction à l'intérieur même du module en incorporant des éléments à fort coefficient de conduction (copeaux ou nid d'abeilles en aluminium,...). Ces différentes manières diminuent l'effet convectif à l'intérieur du matériau sans toutefois qu'il soit négligeable comme le montrent les mesures réalisées au laboratoire (Figure 11).

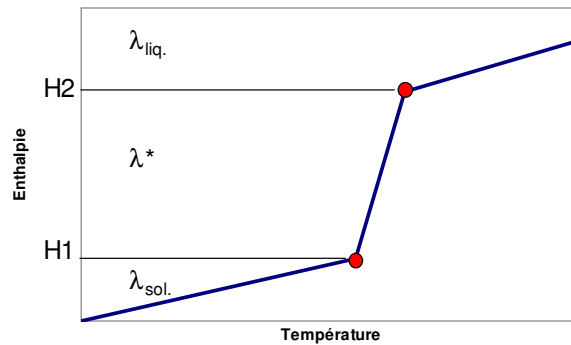


**Figure 11 : Refroidissement d'un module de paraffine contenant 5% de copeaux d'aluminium.**

Toutefois, pour diminuer la complexité et par conséquent le temps de simulation, la convection interne au PCM n'est pas modélisée. Il est possible de prendre en compte cette augmentation de transfert de chaleur par convection en augmentant le coefficient de conduction à l'état liquide.

### 3.3 CONDUCTION THERMIQUE DANS LE PCM À L'ÉTAT SOLIDE OU LIQUIDE

Afin de prendre en compte la différence de conduction thermique entre les états solide et liquide d'un matériau, l'utilisateur peut donner deux valeurs distinctes pour le coefficient de conduction en phase solide et liquide. Lors du changement de phase, cette valeur de conduction thermique est calculée par interpolation linéaire en fonction de l'enthalpie (Figure 12).



**Figure 12 : Détermination du coefficient de conduction thermique  $\lambda$  en fonction de l'enthalpie H.**

En-dessous de la valeur de l'enthalpie H1, le coefficient de conduction thermique  $\lambda$  est constant et est égal à  $\lambda_{sol}$ . Au-dessus de la valeur de l'enthalpie H2, le coefficient de conduction thermique  $\lambda$  est constant et est égal à  $\lambda_{liq}$ . Entre H1 et H2 :

$$\lambda^* = \lambda_{sol} + \frac{(\lambda_{liq} - \lambda_{sol})}{(H2 - H1)}(H^* - H1) \quad [-] \quad (J)$$

Où  $H^*$  est la valeur de l'enthalpie au moment considéré.

Cette fonction permet également d'ajuster la valeur de la conduction à l'état liquide pour tenir compte de l'augmentation de transfert de chaleur par convection interne au PCM.

### 3.4 CONVECTION ENTRE L'EAU ET LE PCM

Le coefficient de convection est calculé pour chaque couche, un calcul est prévu selon la forme choisie :

- Plaque → convection plaque verticale
- Cylindre → idem plaque
- Sphère → convection autour d'une sphère en convection libre et dans un lit de sphère pour la convection forcée [9].

Le Tableau 6 et les équations (K) et (L) suivants définissent les différents calculs du coefficient convectif en fonction de la forme du module de PCM ainsi que du mode d'écoulement du fluide autour de ces modules.

| Convection       | Plaque ou cylindre vertical  | Lit de sphères   |
|------------------|--|--|
| Libre laminaire  | $Nu = \left\{ 0.825 + \frac{0.387.Ra^{1/6}}{\left[ 1 + (0.492/Pr)^{9/16} \right]^{8/27}} \right\}^2$ | $Nu = 2 + 0.56 \left( \frac{Pr}{0.846 + Pr} Ra \right)^{1/4}$  |
| Libre turbulent  |  |  |
| Forcée laminaire | $Nu_x = 0.332 Re_x^{1/2} . Pr^{1/3}$   | $Nu_{laminaire} = 0.664 . (Re/\varepsilon)^{1/2} . Pr^{1/3}$   |
| Forcée turbulent | $Nu_x = 0.0296 Re_x^{4/5} . Pr^{1/3}$  | $Nu_{turbulent} = \frac{0.037 (Re/\varepsilon)^{0.8} Pr}{1 + 2.443 (Re/\varepsilon)^{-0.1} (Pr^{2/3} - 1)}$ $Nu_{Global} = 2 + (Nu_{laminaire}^2 + Nu_{turbulent}^2)^{1/2}$ $Nu = (1 + 1.5(1-\varepsilon)) . Nu_{Global}$ <p>(<math>\varepsilon</math>=fraction de vide dans le lit)</p> |

**Tableau 6 : Equations régissant le calcul du coefficient convectif d'un fluide selon la forme du module de PCM.**

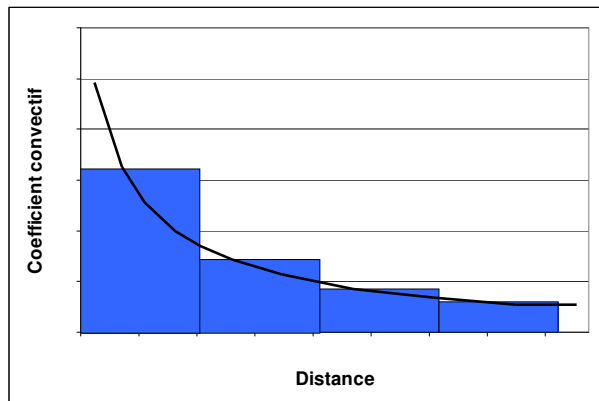
Calcul de Nu mixte entre la convection libre et forcée :

$$Nu_{Mixte} = (Nu_{Libre}^3 + Nu_{Forcée}^3)^{1/3} \quad (K)$$

Coefficient de convection :

$$\alpha = \frac{Nu_{Mixte} . \lambda}{x} \quad [W/m^2.K] \quad (L)$$

Un coefficient correcteur a été déterminé pour prendre en compte l'effet de découpage vertical du module de PCM en différentes couches (pour plaque ou cylindre). En effet, le coefficient de convection évolue de façon non linéaire le long de la paroi considérée (Figure 13). Ainsi, le nombre de couche influence fortement le calcul de la convection. Plus ce nombre de couches est important, plus le calcul se rapproche de la réalité. Dans un premier temps, nous avons réalisé des calculs dans différentes configurations :



**Figure 13 : Evolution du coefficient convectif le long d'une paroi.**

- courbe noire = valeur réelle
- histogramme bleu = calculs pour 4 couches

nombre de couches verticales, convection libre ou forcée, laminaire ou turbulent, hauteur du module de PCM et à différents niveaux de température. Ensuite, une comparaison avec la courbe théorique (courbe noire de la Figure 13) a permis de définir une équation pour le calcul d'un coefficient correcteur.

Lors des premières comparaisons entre les mesures et les simulations, différents comportements des PCM comme entre autres l'hystérésis ou la surfusion ont été observés. Afin de prendre en compte ce type de comportement, le modèle numérique a été modifié.

### 3.5 HYSTÉRÉSIS

Le phénomène d'hystérésis apparaît lors du refroidissement de certains matériaux. Il se traduit par un retard du changement de phase. Il ne dépend pas de la présence de phase liquide ou solide aux alentours, et donc ce processus peut être calculé indépendamment pour chaque nœud de PCM.

Dans un premier temps, le modèle ne tenait pas compte de ce phénomène d'hystérésis et le chauffage ou le refroidissement se faisaient sur la même courbe.

Suite aux mesures effectuées pour la validation, l'implémentation de ce comportement physique fut nécessaire. La Figure 14 illustre cette nouvelle fonction. Il y a un simple décalage de la courbe enthalpique selon un  $\Delta T$  défini dans le paramétrage dont la valeur est déterminée par mesures expérimentales. Lors d'une modification du processus de chauffage ou de refroidissement du PCM dans la zone de changement de phase, la pente de transition est la même que celle de la phase solide dans la partie inférieure du changement de phase et identique à celle de la phase liquide dans la partie supérieure du changement de phase. Ceci évite toute discontinuité de la courbe enthalpique, lorsque le point de transition est proche du changement de phase complet (liquide ou solide).

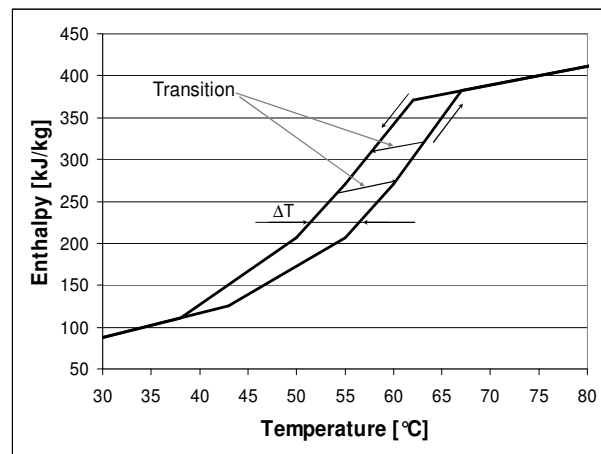
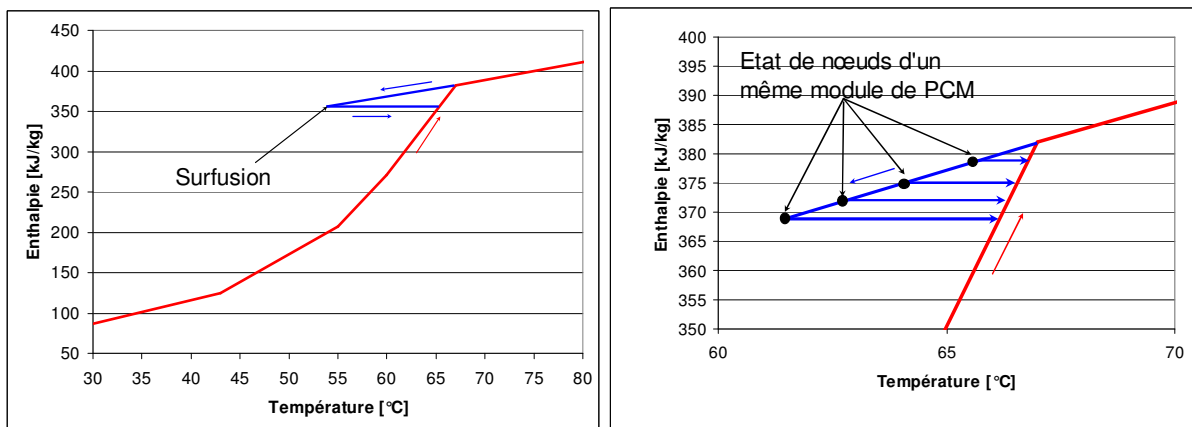


Figure 14 : Principe du modèle d'hystérésis.

### 3.6 SURFUSION

Contrairement au phénomène précédent, la surfusion dépend de la présence ou non de la phase solide. La détermination de l'apparition de ce processus tient compte de l'état global du module de PCM. Il faut que tout soit en phase liquide pour que la surfusion puisse se produire. Au moment du refroidissement, dès qu'une partie du PCM atteint le point de cristallisation, tout le reste du PCM passera en phase solide (courbe couleur bleue de la Figure 15). Mais ce phénomène peut débuter à une température inférieure à la température de la fin du changement de phase solide à liquide.

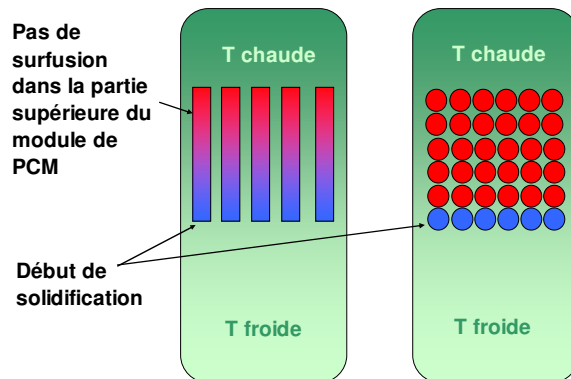


**Figure 15 : Principe du modèle de surfusion.**

Ainsi, pour des cylindres ou des plaques, la surfusion pourra apparaître une seule fois lors du processus de refroidissement. En effet, lorsque la cristallisation débute autour d'un noyau de condensation, la solidification va se propager dans tout l'élément avec une vitesse qui est supposée ici instantanée, car nous n'avons aucun moyen de connaître la vitesse de propagation de la cristallisation dans l'élément, comme le montre la partie de gauche de la Figure 16.

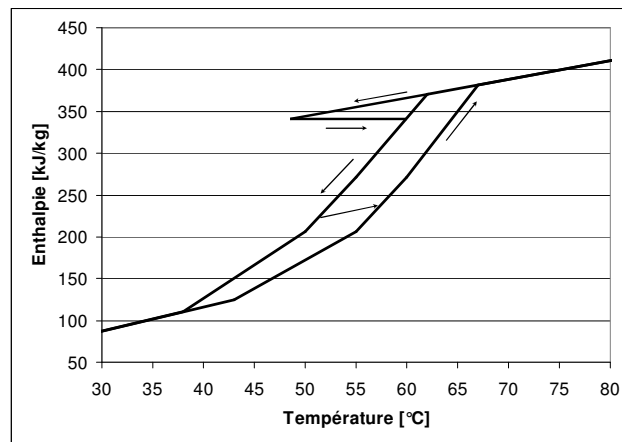
Dans le cas de module sphérique, ce phénomène apparaîtra à chaque couche de sphères. En effet, lors de la décharge, la partie basse de la cuve se refroidit en premier.

Dans le cas d'un lit de sphères, la première couche inférieure de sphères passera en surfusion alors que les autres devront attendre que la cuve finisse de se décharger, comme schématisé dans la partie de droite de la Figure 16.



**Figure 16 : Différence de propagation de la cristallisation selon le type de containers.**

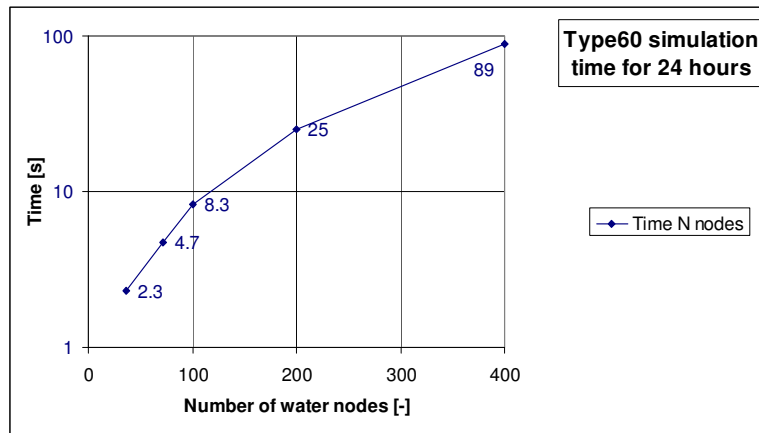
Les phénomènes d'hystérésis et de surfusion peuvent également s'ajouter entre eux comme l'illustre la Figure 17. Dans le modèle, chacun de ces phénomènes sont traités indépendamment l'un de l'autre par un indicateur d'état spécifique. Il est à noter que le processus de surfusion ne peut pas intervenir avant celui d'hystérèse, ce qui en simplifie la programmation.



**Figure 17 : Combinaison de l'hystérèse et de la surfusion.**

### 3.7 RÉDUCTION DU TEMPS DE CALCULS

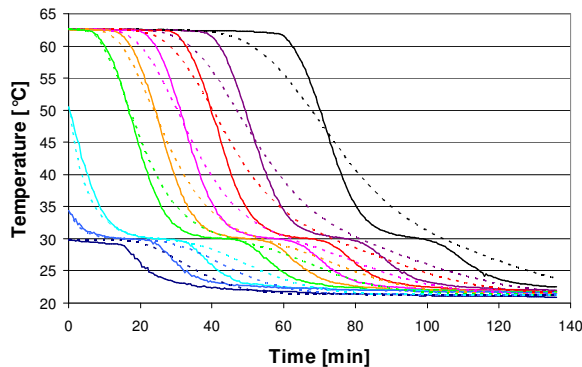
Pour une meilleure précision de calculs, il est utile d'avoir un nombre de couches important dans la cuve d'eau. Malheureusement, cette augmentation du nombre de couches (diminution de la taille des couches) entraîne également une élévation du temps de calculs. La Figure 18 illustre cet accroissement du temps de calculs avec le type 60 de TRNSYS pour une simulation représentant 24 heures d'utilisation réelle. Il est à noter que le modèle de cuve TRNSYS accepte jusqu'à 100 couches dans sa version standard.



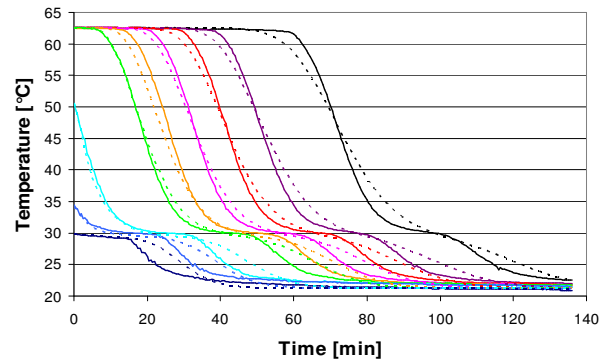
**Figure 18 : Augmentation du temps de calculs en fonction du nombre de couches. Le processeur utilisé est un Pentium 4 de 1,6 GHz.**

Ce problème est connu des utilisateurs de TRNSYS et est généralement contourné en réduisant le nombre de couches dans la cuve, donc en perdant de la précision, afin d'avoir des temps de calculs raisonnables. Pour une simulation annuelle, il est couramment admis que le nombre de couches peut être faible, environ 10 [13], les imprécisions se compensant tout au long des calculs. Par contre, pour des simulations sur du court terme, le nombre de couches doit être plus élevé.

Les graphiques de la Figure 19 illustrent les différences entre les mesures de températures réalisées dans une cuve d'eau et les simulations réalisées avec respectivement 36, 100 et 400 couches. Les températures expérimentales sont en trait fort alors que celles issues de simulations sont en pointillés. Les courbes représentent 9 températures à différents niveaux dans une cuve de 500 litres. La partie haute de cette cuve est à 63 [°C] (couleur verte à noire) et la partie basse est à 30 [°C] (bleue foncée). Une injection d'eau froide à 21 [°C] pour un débit de 250 [l/h] est appliquée en partie basse. Il est clair que les meilleurs résultats de simulations sont obtenus avec un nombre important de couches. Pour comparer le comportement d'un module de PCM entre des mesures et des simulations, il est primordial d'obtenir une bonne similitude de comportement de la cuve en eau entre le modèle numérique et l'expérimentation en utilisant dans ce cas 400 couches.



(a) 36 couches – Temps de calculs 0.6 [s]

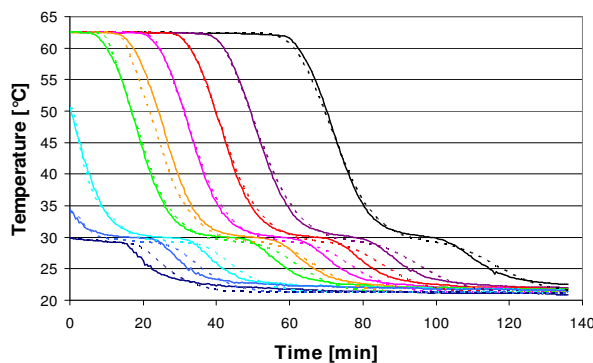


(b) 100 couches – Temps de calculs 1,1 [s]

Figure 19 : Influence de l'augmentation du nombre de couches sur la précision des résultats (type60 TRNSYS).

- Courbes en traits fort = mesures expérimentales

- Courbes en pointillés = simulations



(c) 400 couches – Temps de calculs 14 [s]

Jusqu'à présent, le maillage des modules de PCM était intimement lié au nombre de couches verticales discrétisant la cuve de stockage en eau (Figure 20). Or le temps de calcul est encore plus sensible lorsque la cuve contient des modules de PCM, car pour chaque nœud d'eau (indice  $i$ ), il y a  $n$  nœuds de PCM (indice  $k$ ) comme le montre la Figure 20. Dans une cuve avec des cylindres de PCM de 50 [cm] de haut séparés verticalement par 10 couches (1 couche pour 5 [cm]) et ayant 10 nœuds radialement, cela fait un total de 100 nœuds de calculs uniquement pour le PCM. Si on augmente d'un facteur 5 le nombre de couches verticales, il y aura 500 nœuds.

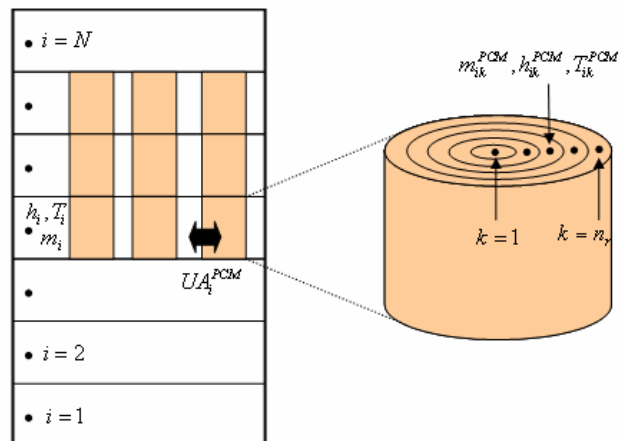


Figure 20 : Maillage classique des différents nœuds de calculs pour l'eau et le PCM.

Afin d'améliorer la précision des simulations tout en conservant des temps de calculs acceptables, l'idée développée dans le cadre de ce projet était de dissocier les nœuds pour l'eau et ceux du PCM, comme le montre la Figure 21. Nous avons ainsi un gain de temps important par rapport aux premières simulations avec le PCM tout en gardant une bonne précision de calculs.

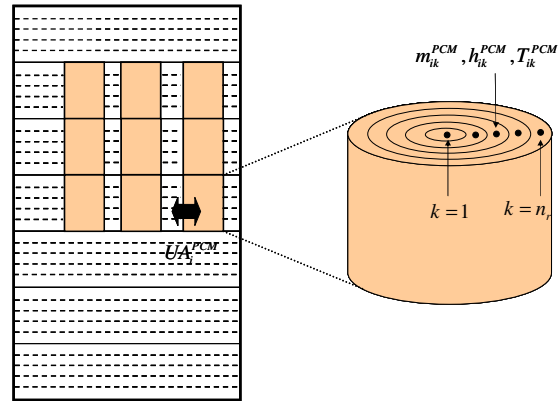


Figure 21 : Nouveau maillage des nœuds de calculs pour l'eau et le PCM.

La Figure 22 montre le temps nécessaire pour simuler notre cuve avec du PCM représentant 24 heures d'utilisation réelle. Plusieurs quantités de nœuds pour la cuve ont été simulées.

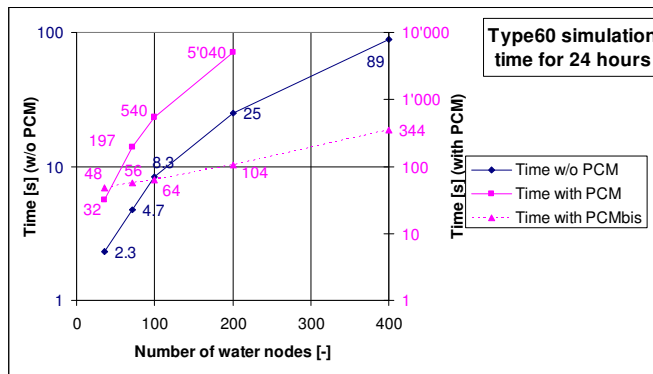


Figure 22 : Temps de calculs nécessaire pour simuler le comportement d'une cuve pendant 24 heures.

24 heures en fonction du nombre de nœuds d'eau. Ces temps de calculs ont été obtenus avec un processeur Pentium 4 de 1,6 GHz.

w/o PCM = sans PCM

with PCM = avec PCM sans découplage des couches eau/PCM

with PCMbis = avec PCM utilisant le nouveau découplage des nœuds eau/PCM.

Comme on le remarque, le temps nécessaire, entre une cuve sans PCM (Time w/o PCM) et avec PCM (Time with PCM), est dans notre cas multiplié par un facteur compris entre 15 et 20 selon le nombre de nœuds utilisés, ce qui est inacceptable. Avec la nouvelle méthode de découplage utilisée pour le PCM (Time with PCMbis), le temps est réduit d'un facteur 50 pour 200 nœuds dans l'eau par rapport à la méthode (Time with PCM), valeur qui augmente avec le nombre de nœuds. Bien sûr, ces valeurs ne sont qu'indicatives car elles dépendent du type de processeur, du type de cuve avec ou sans échangeur et du type de PCM pris en compte.

En plus du gain de temps de simulation, cette solution a les avantages suivants pour une simple cuve en eau :

- de séparer une cuve en un nombre important de couches, par exemple 200, en introduisant les températures initiales pour 20 couches seulement si ces dernières sont subdivisées en 10. En effet, lors de mesures, il est rare d'avoir plus de 20 mesures de températures dans une cuve. Il est fastidieux et arbitraire de définir des températures dans un grand nombre de couches où il n'y a pas de mesure.
- de changer le nombre de couches sans devoir changer les 'Outputs' dans le deck permettant ainsi de visualiser son influence et d'optimiser le temps de simulation.
- d'utiliser plusieurs cuves dans un même deck sans devoir augmenter le nombre de 'Derivatives' (nombre températures initiales) inscrit dans le fichier 'param.inc'.

## 4 Expérimentation

Afin d'analyser la conformité du modèle numérique, une série d'expériences a été effectuée pour mesurer la variation temporelle et spatiale de la température dans un récipient contenant différents types et différentes configurations de PCM. Le principe expérimental était d'effectuer un cycle de charge suivi d'une décharge thermique du PCM tout en mesurant l'évolution dans le temps de la température en différents points à l'intérieur du PCM.

- La *charge thermique* impliquant le changement de phase dans le PCM (chaleur latente) s'effectue en plongeant le récipient contenant ce même PCM solide dans un stock d'eau ayant une température supérieure à la température de solidification.
- La *décharge thermique* de la chaleur latente contenue dans le PCM s'effectue en remplissant d'eau froide (à une température inférieure à la température de solidification) le stock d'eau chaude contenant le récipient de PCM liquide. Ce dernier étant déjà dans ce stock d'eau au début de cette étape, une attention particulière est portée à l'uniformité de la température dans le PCM.

### 4.1 RÉCIPIENT CONTENANT LE PCM

La Figure 23 montre le récipient employé pour cette série d'expériences. Cette bouteille en aluminium est utilisée dans le domaine de la chimie, ses dimensions et son volume sont :

Diamètre  $\varnothing_{\text{ext}} = 88$  [mm]

Hauteur totale  $H = 237$  [mm]

Contenance = 1.1 [litres]

Épaisseur des parois = 0.3 [mm]



Figure 23 : Récipient utilisé.

La bouteille avec son bouchon en polypropylène ont été testés à la pression. En effet, la paraffine a une dilatation d'environ 10% lors du changement de phase (augmentation en se liquéfiant, contrairement à l'eau). Afin d'éviter les fuites, le joint d'origine en mousse polyéthylène a été remplacé par deux rondelles, une en aluminium et l'autre en caoutchouc comme le montre la Figure 24. Ainsi la pression relative de test atteinte a été de 3 bars à une température de 85 [°C]. Le remplissage de la bouteille pourra se faire avec un peu plus de 1 litre de PCM.



Figure 24 : Fermeture améliorée.

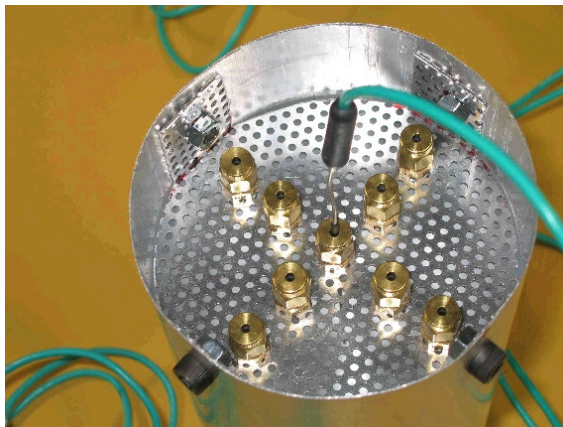
## 4.2 SONDES DE MESURE DE TEMPÉRATURE

Afin de pouvoir suivre l'évolution temporelle de la température dans le PCM, des thermocouples ont été placés en plusieurs points à l'intérieur du PCM. Différentes approches ont été considérées en fonction du type de PCM étudié. En effet, le positionnement des sondes est très important afin de pouvoir comparer mesures expérimentales et résultats de simulations. Il a donc fallu trouver des solutions adaptées aux PCM utilisés pour assurer le positionnement précis des sondes dans le récipient avant et après remplissage du PCM.

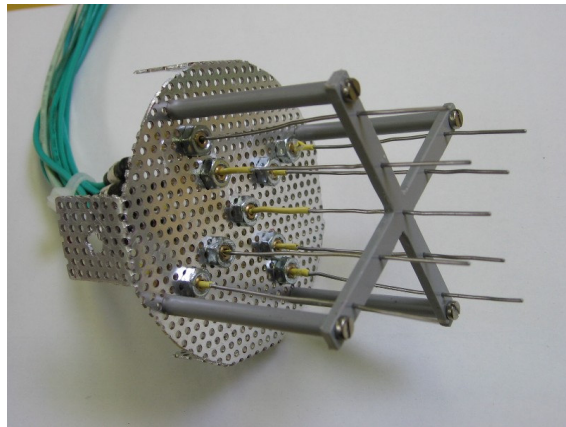
Les quatre situations suivantes ont été considérées :

### 4.2.1 Paraffine pure

Le goulot de la bouteille est supprimé afin de faire sortir les câbles des sondes de mesures de température comme le montre la Figure 25a. Pour conserver la distance entre les sondes, une grille perforée et une croix en plastique ont été utilisées comme le montre la Figure 25b



(a) Bouteille décapitée.



(b) Support pour les thermocouples.

Figure 25 : Système de mesures de température dans la paraffine.

La paraffine liquide est alors versée dans le récipient. Après refroidissement, ce récipient est plongé dans la cuve d'essai, sortie des câbles de sondes vers le bas. En effet, la paraffine reste dans le haut du récipient pour différentes raisons :

- non miscible dans l'eau.
- densité à l'état solide et liquide inférieure à l'eau.
- pas de mouvement important de l'eau de la cuve.

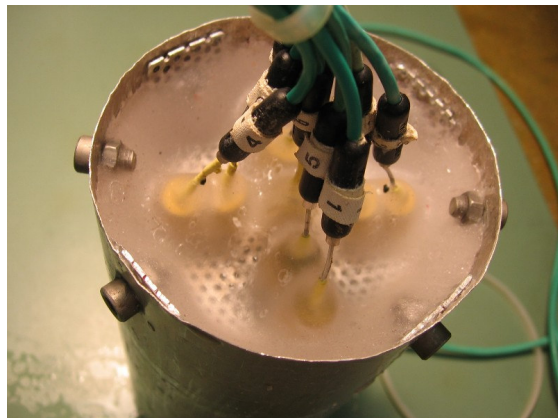


Figure 26 : Récipient rempli de paraffine avec sorties des thermocouples.

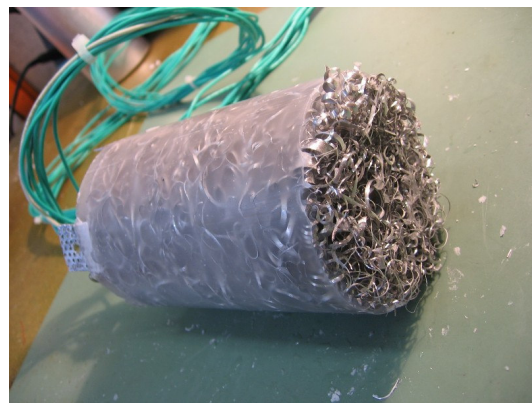
#### 4.2.2 Paraffine + copeaux d'aluminium

Pour améliorer la conduction dans la paraffine, le récipient contenant la paraffine a été préalablement rempli avec des copeaux d'aluminium. Deux concentrations différentes de ces copeaux d'aluminium ont été testées, 5 et 10% en volume.

Dans ce cas, les sondes de température sont glissées à travers les copeaux d'aluminium. Comme pour le cas précédent, la position des sondes est garantie par une croix en PVC qui permet également de maintenir les copeaux d'aluminium avant de placer l'ensemble dans le récipient comme le montre la Figure 27. La paraffine liquide est ensuite versée dans le récipient afin de remplir les interstices entre les copeaux d'aluminium.



(a) disposition des thermocouples.



(b) bloc de paraffine avec copeaux d'aluminium.

Figure 27 : Copeaux d'aluminium avec 5% en volume.

#### 4.2.3 Paraffine + nid d'abeilles en aluminium

Une seconde solution a été testée pour améliorer la conduction dans la paraffine par l'ajout d'un nid d'abeilles en aluminium comme le montre la Figure 28. Ce nid d'abeilles représente un volume occupé d'aluminium de 2%.

Comme précédemment, le goulot d'une bouteille en aluminium a été enlevé afin de permettre le passage de la structure alvéolaire

Les sondes ont été glissées dans les cavités (cf. image). La paraffine liquide a été ensuite versée pour remplir les alvéoles.

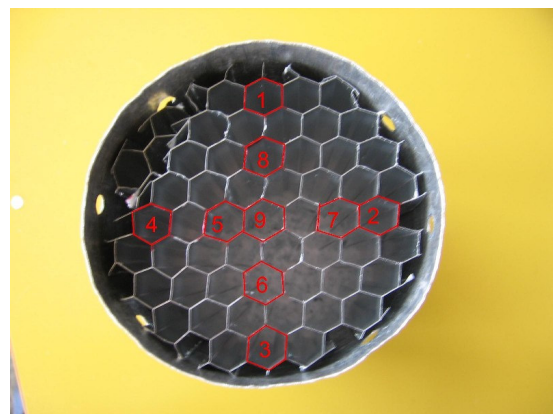


Figure 28 : Disposition des thermocouples dans le nid d'abeilles.

#### 4.2.4 Acétate de sodium + graphite

Un troisième test a été réalisé avec de l'acétate de sodium et du graphite. Nous avons dû changer le récipient cité plus haut afin d'éviter tout contact avec l'eau. En effet, les caractéristiques physico-chimiques, comme la densité plus élevée que l'eau et la miscibilité avec cette dernière nous obligeait à modifier le mode de mesures. Nous avons donc utilisé une bouteille fermée et les quatre thermocouples ont été disposés perpendiculairement à la surface de la bouteille mais à des profondeurs différentes comme le montre la Figure 29.

La densité est d'environ 1.3 en remplissant la bouteille en plusieurs fois et en tassant à chaque remplissage de façon à casser les granulés.

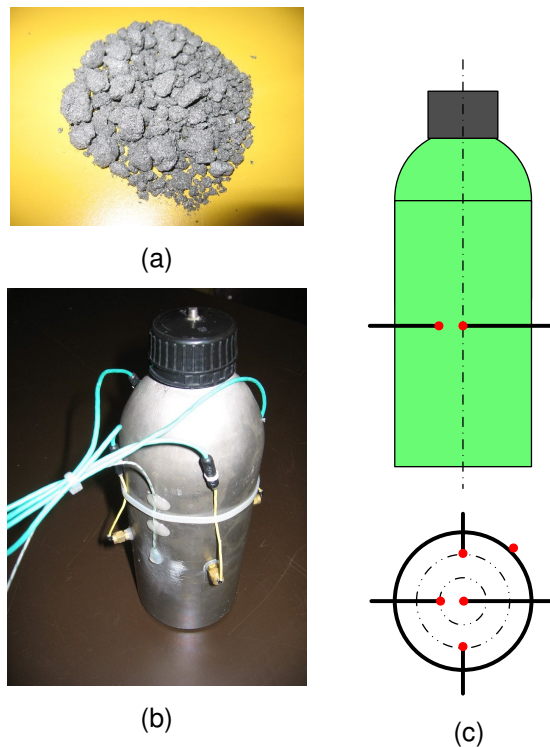


Figure 29 (a) : Granulés d'acétate de sodium+graphite.  
Figure 29 (b) et (c) : Bouteille contenant l'acétate de sodium+graphite avec le système de mesures.

Le Tableau 7 résume les propriétés thermiques de la paraffine et de l'acétate de sodium utilisés dans ces expériences :

| Propriétés                    | Paraffine (RT54)              | Acétate de sodium + graphite  |
|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|
| Conduction [W/m.K]            | 0.2 (solide et liquide)       | 4 (solide et liquide)         |
| Densité [kg/l]                | 0.9 (solide) – 0.75 (liquide) | 1.3 à 1.4 (solide et liquide) |
| Cp [kJ/kg]                    | 1.8 (solide) – 2.4 (liquide)  | 2 (solide et liquide)         |
| Chaleur latente [kJ/kg]       | 180                           | 150                           |
| [kJ/l]                        | 150                           | 240                           |
| Température de transformation | 54                            | 58                            |

Tableau 7 : Propriétés thermiques de la paraffine et de l'acétate de sodium avec du graphite.

Les figures ci-dessous montrent les courbes enthalpiques des deux PCM utilisés pour ces expériences.

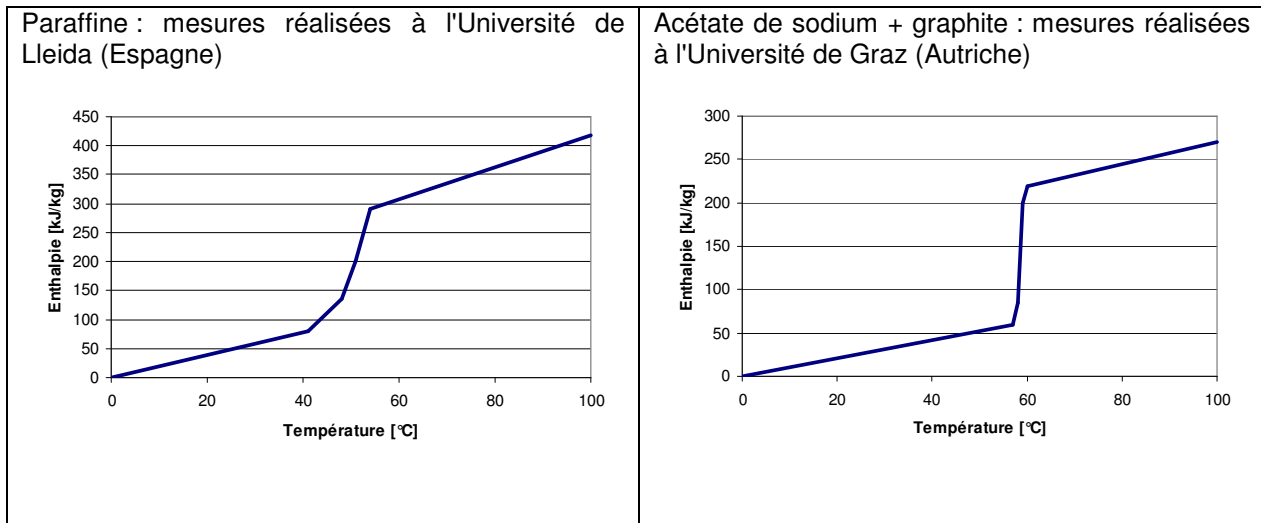


Figure 30 : Courbes enthalpiques pour la paraffine (RT54) et l'acétate de sodium+graphite.

Comme cette série d'expériences consistait à comparer les mesures expérimentales et les résultats de simulations, il était important que la paraffine soit homogène. Or, nous avons constaté que des cavités d'air se formaient dans la paraffine lorsque cette dernière était refroidie trop rapidement. La Figure 31 montre la formation de ces cavités en fonction de trois durées différentes de refroidissement du récipient contenant une même quantité de paraffine.

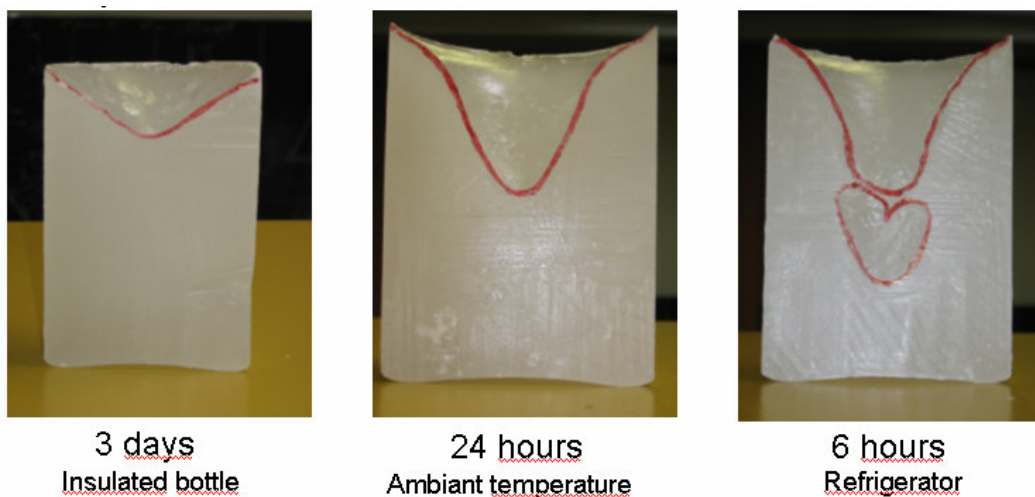


Figure 31 : Influence de la vitesse de refroidissement sur la formation de cavité.

Le refroidissement de la surface extérieure induit la formation de cavités. En effet, la paraffine forme une coque solide le long du récipient alors que l'intérieur reste liquide. Mais en se solidifiant, la paraffine se contracte d'environ 10%.

Si la solidification est lente, la paraffine latérale se rétracte progressivement et la surface supérieure suit le mouvement par gravité et remplit le vide ainsi formé.

Si la solidification est trop rapide, la paraffine latérale se rétracte rapidement et la surface supérieure ne peut pas suivre le mouvement et donc remplit le vide ainsi formé. Il y aura ainsi apparition d'une cavité d'air.

### 4.3 CUVE GRISE

Avant de débuter un test, notre cuve de 500 litres était maintenue à une température constante au-dessus de la température de fusion (différente selon le PCM analysé). Puis le récipient, contenant le PCM à l'état solide et équipé de sondes de température, était plongé dans la cuve.

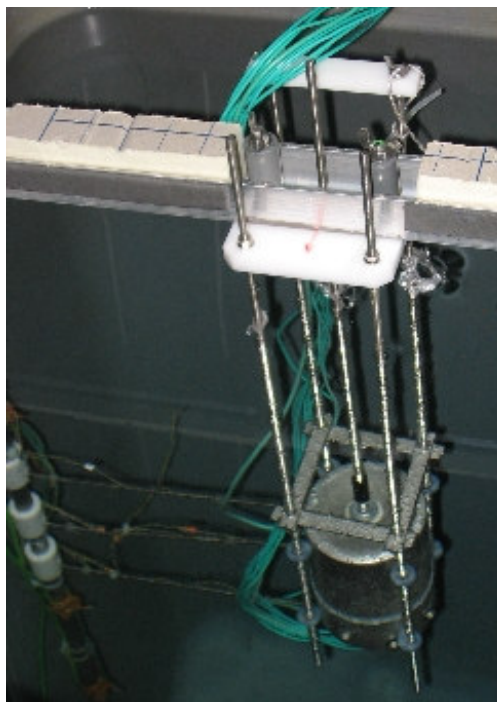


Figure 32 : Cuve grise en plastique et son système de mesures de températures.

Une fois le PCM complètement fondu, un temps de stabilisation thermique permet de s'assurer de l'homogénéité de la température dans le PCM.

### 4.4 PRINCIPE GÉNÉRAL DE MESURES

En plus des thermocouples placés à l'intérieur même du module de PCM, neuf autres mesures de température sont réalisées dans la cuve à différents niveaux permettant d'en suivre l'évolution dans le temps. Un schéma explicatif de la position de chaque sonde est disponible en annexe (A2). L'acquisition de toutes ces températures se fait toutes les 30 secondes. L'arrêt des mesures a lieu lorsque l'évolution des températures dans le module de PCM est nulle.

Tous les résultats expérimentaux ont été transmis à différents groupes participants à la Tâche 32, à savoir l'université de Lleida (Espagne), Université de Graz (Autriche) et Université de Lyngby (Danemark).

## 5 Comparaisons entre simulations et résultats expérimentaux

Etant donné que le modèle n'inclut pas la convection dans le PCM, la conformité entre simulations et les résultats expérimentaux n'est pas satisfaisante dans le cas de la paraffine pure comme le montre la partie de gauche de la Figure 33, car la convection y est importante. Afin de tenir compte artificiellement de la convection de la paraffine à l'état liquide, le coefficient de conductivité thermique a été augmenté dans les simulations de 0.2 [W/(m K)] (valeur réelle) à 0.9 [W/(m K)] (valeur ajustée). Dans ce cas, les résultats sont meilleurs comme le montre la partie droite de la Figure 33.

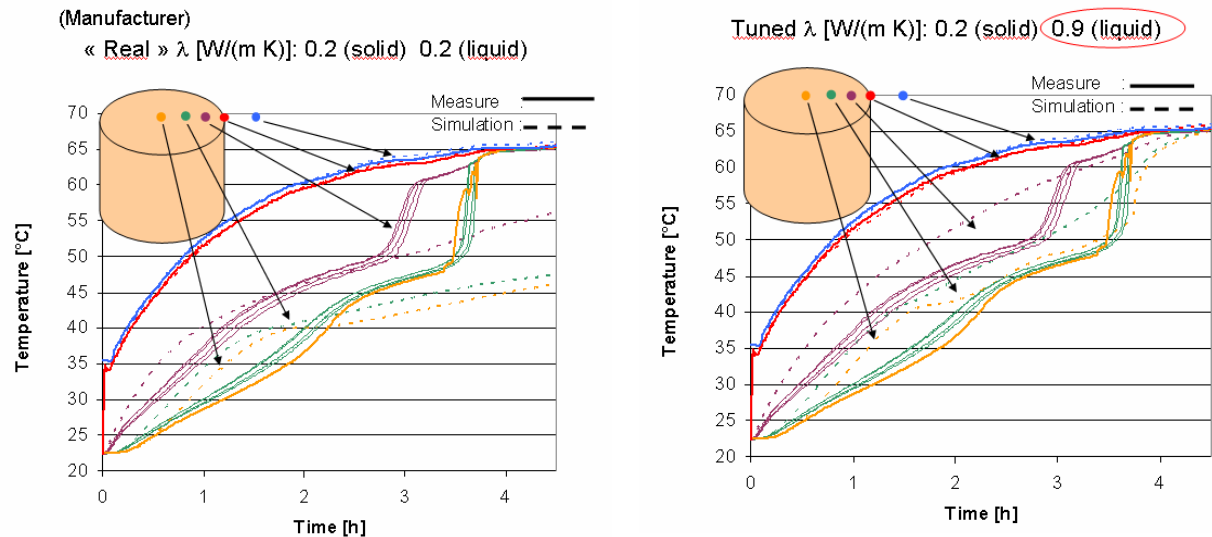
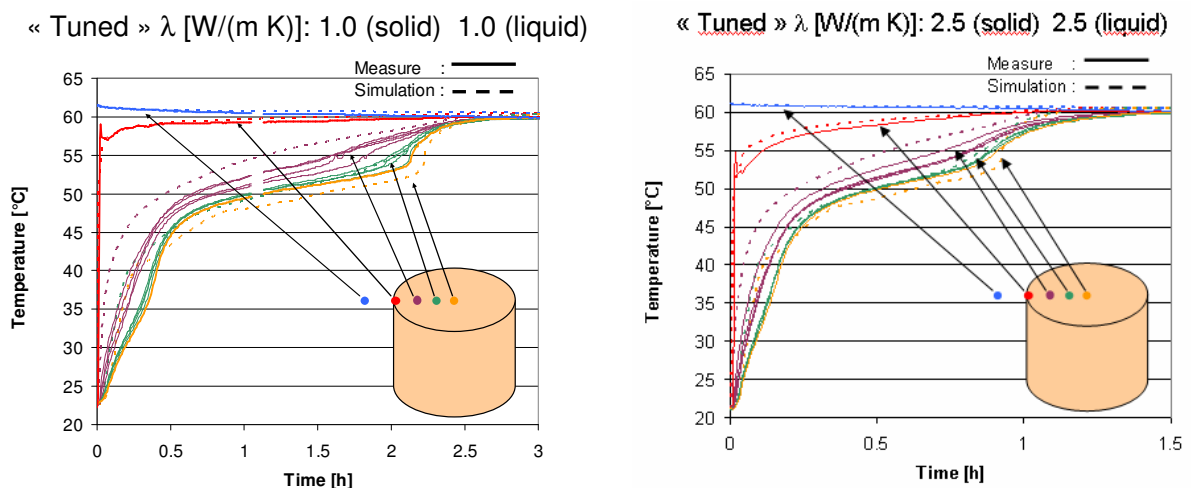


Figure 33 : Comparaisons simulations (pointillés) et mesures (traits pleins) pour la paraffine (RT54). A gauche, les valeurs du lambda ne sont pas ajustées. A droite, les valeurs du lambda sont ajustées afin que la fin de changement de phase se réalise au même moment.



Paraffine avec nid d'abeilles (2% aluminium)

Paraffine avec copeaux d'aluminium (10%)

Figure 34 : Comparaisons simulations (pointillés) et mesures (traits pleins) pour la paraffine avec adjonction d'éléments conducteur en aluminium. Les valeurs du lambda sont ajustées afin rendre les simulations proches des mesures.

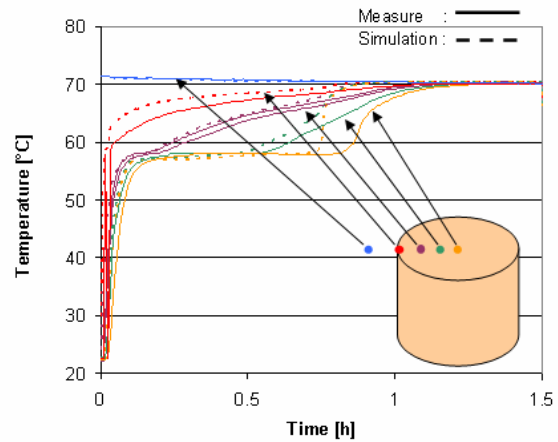
Si la convection est perturbée pas l'ajout de copeaux ou d'une structure en nid d'abeilles en aluminium ayant une conductibilité thermique élevée, la conformité entre expérience et simulation s'améliore comme le montre la Figure 34.

La situation s'améliore nettement lorsque la convection est négligeable voire inexistante dans le PCM comme c'est le cas dans l'acétate de sodium avec du graphite. En effet, la Figure 35 montre une bonne conformité entre simulation et mesures.

Il ressort des mesures effectuées que la convection est un phénomène qui ne peut pas être omis dans le calcul du transfert de chaleur dans un PCM ayant une faible viscosité. Toutefois, le modèle actuel, qui ne tient pas compte de la convection, peut être raisonnablement utilisé que pour des PCM ayant une très grande viscosité à l'état liquide comme c'est le cas du sodium d'acétate avec graphite.

(Manufacturer)

« Real »  $\lambda$  [W/(m K)]: 4.0 (solid) 4.0 (liquid)



**Figure 35 : Comparaisons simulations (pointillés) et mesures (traits pleins) pour l'acétate de sodium+graphite. Dans ce cas, les valeurs du lambda n'ont pas été modifiées par rapport aux valeurs du fournisseur.**

Les figures illustrent les comparaisons entre des simulations et des mesures expérimentales. Ces dernières sont disponibles en annexes (A3) à (A6).

## 5.1 COEFFICIENT DE CONDUCTION EFFECTIF

Comme nous l'avons constaté dans le chapitre précédent, le modèle numérique donnait des résultats très différents de ceux obtenus par mesures (Figure 33). Ce problème était lié au calcul du transfert de chaleur dans le PCM. En effet, dans un souci de simplicité de programmation, nous avons négligé la convection naturelle dans le matériau à changement de phase à l'état liquide. Une deuxième méthode consistait à ajuster le coefficient de conduction thermique à l'état liquide pour que la simulation corresponde davantage aux mesures.

Au début de l'année 2006, nous avons modifié le modèle de la cuve en introduisant le calcul du coefficient de conduction effectif, méthode simple permettant de prendre en compte la convection à l'intérieur du matériau.

### 5.1.1 Comparaison mesures vs simulations (modèle "cuve/PCM 2006")

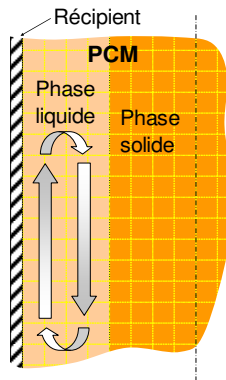
La méthode du coefficient de conduction effectif permet de tenir compte de la convection interne sans compliquer la programmation.

$$\lambda_{eff} = \lambda \cdot Nu \quad (M)$$

où :  $Nu$  = nombre de Nusselt pour la convection interne [-]

$\lambda$  = coefficient de conduction [W/(m.K)]

$\lambda_{eff}$  = coefficient de conduction effectif [W/(m.K)]



**Figure 36 : Convection naturelle dans le PCM**

Il existe plusieurs sources qui donnent différentes équations régissant la convection à l'intérieur de cavités. La dimension de la cavité où apparaît la convection naturelle influence la valeur du coefficient de convection. Il faudrait prendre en compte la hauteur et la largeur de la cavité. Cependant, certaines équations ne font pas intervenir la notion de hauteur de la cellule convective. Elles sont valables dans la limite d'un rapport hauteur sur largeur compris entre 1 et 40 pour les liquides. Cette plage de valeurs nous semble suffisamment large pour être utilisée dans le cas de figure de module de PCM. Ainsi, nous nous sommes concentrés sur la détermination de l'épaisseur de la couche de PCM liquide pour définir le nombre de Nusselt dans chaque nœud du modèle. Nous avons retenu les équations (N) et (O) de [8] et [9]. Le calcul du nombre de Nusselt est donné par [8] pour les formes rectangulaires ou cylindriques et [9] pour les sphères :

- pour une plaque rectangulaire ou un cylindre : nombre de Rayleigh :  $10^6 < Ra < 10^9$

$$Nu = 0.046Ra^{1/3} \quad [-] \quad (N)$$

- pour une sphère avec :  $10^2 < Ra < 10^9$

$$Nu = 0.228Ra^{0.226} \quad [-] \quad (O)$$

- Rayleigh est défini par :

$$Ra = ABS \left[ \frac{g \cdot \beta \cdot (T_{froid} - T_{chaud}) \cdot x^3}{\nu \cdot a} \right] \quad [-] \quad (P)$$

Avec :  $g = 9.81 \text{ [m/s}^2\text{]}$

$\beta$  = coefficient de dilatation thermique [1/K]

$T_{froid}$  = température côté froid [°C]

$T_{chaud}$  = température côté chaud [°C]

$x$  = épaisseur de la cavité liquide [m]

$\nu$  = viscosité cinématique [m<sup>2</sup>/s]

$a$  = diffusivité thermique [m<sup>2</sup>/s]

La Figure 38 ci-dessous montre les résultats obtenus avec le modèle cuve/PCM 2006.

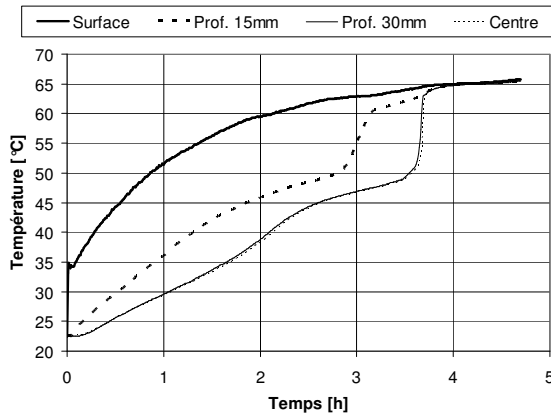


Figure 37 : Mesures en laboratoire (idem mesures de la Figure 33).

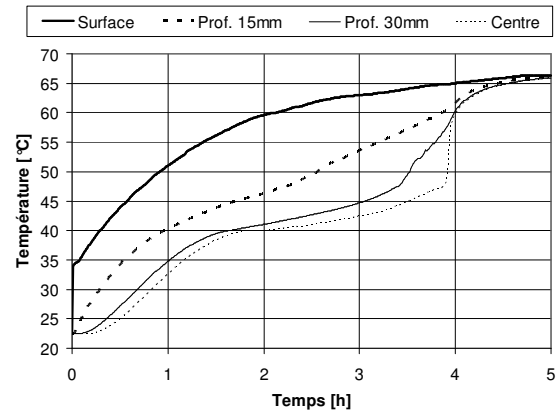


Figure 38 : Simulations avec calcul du coefficient de conduction effectif (modèle cuve/PCM 2006).

Les premières comparaisons entre les mesures et les simulations ont montré une nette amélioration de la modélisation du transfert de chaleur avec la méthode de conduction effectif. Cette façon de faire est plus élégante et plus cohérente que la méthode 2005 (ajustement du coefficient lambda en phase liquide). Par contre, il est nécessaire de connaître les paramètres spécifiques comme la viscosité du matériau à l'état liquide et sa dilatation thermique. Les valeurs de ces paramètres sont souvent mal ou peu connues. Ainsi, nous avons contrôlé la sensibilité de ces paramètres en réalisant des simulations avec des valeurs volontairement très différentes de celles que nous avons utilisées pour la paraffine. Le Tableau 8 ci-dessous résume les valeurs choisies et les Figure 39 à Figure 44 illustrent les résultats de modélisation.

| Paramètre   | Valeur minimale      | Valeur maximale                        | Valeur du fournisseur pour la paraffine | Résultats en :         |
|---|----------------------|--|---|------------------------|
| Viscosité cinématique [10 <sup>6</sup> m <sup>2</sup> /s] | 0.2 (eau à 100 [°C]) | 36 (Huile de transformateur à 20 [°C]) | 5                                       | Figure 39 et Figure 40 |
| Dilatation thermique en phase liquide [1/K]               | 0.0016 (éthère)      | 0.00018 (eau)                          | 0.001                                   | Figure 41 et Figure 42 |

Tableau 8 : Valeurs minimales et maximales choisies pour les paramètres spécifiques liés au calcul de la convection naturelle dans le module de PCM.

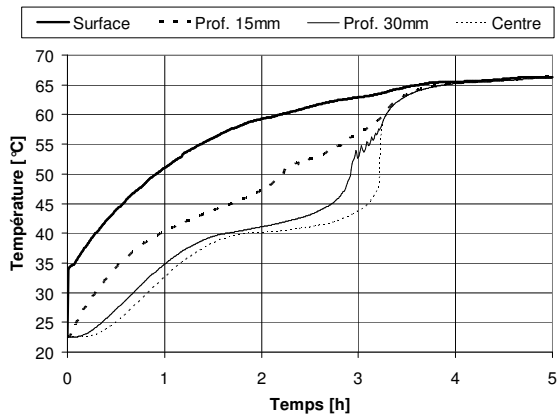


Figure 39 : Simulation avec une viscosité cinématique de  $0.2 [10^6 \text{ m}^2/\text{s}]$ .

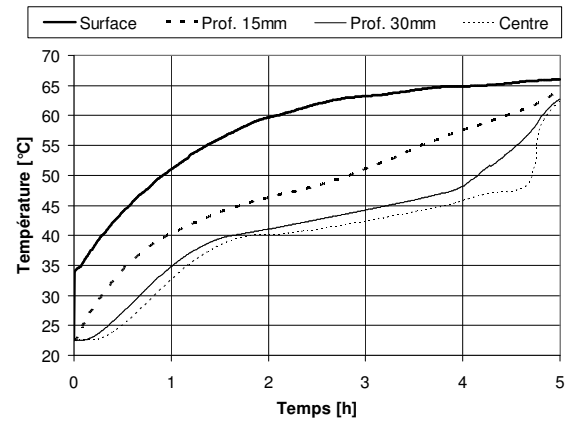


Figure 40 : Simulation avec une viscosité cinématique de  $36 [10^6 \text{ m}^2/\text{s}]$ .

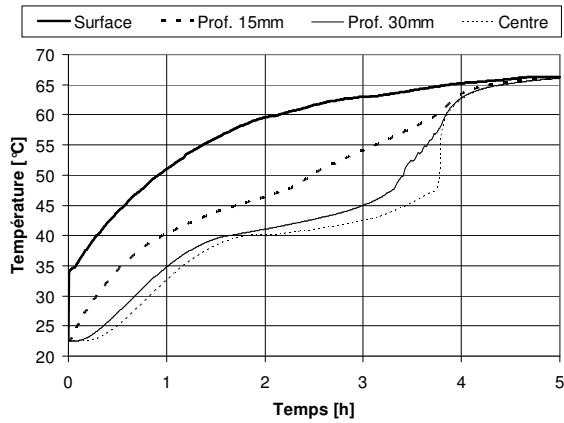


Figure 41 : Simulation avec une dilatation thermique en phase liquide  $0.0016 [1/\text{K}]$ .

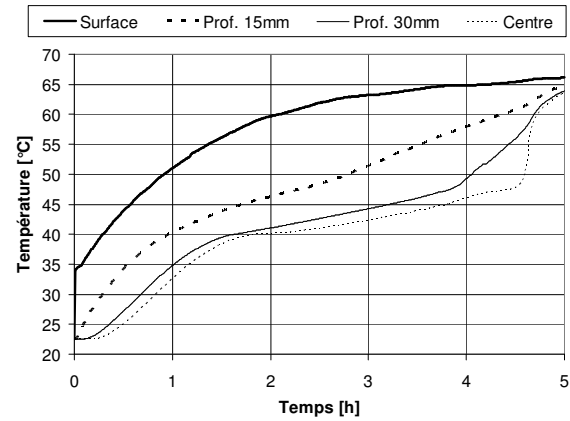
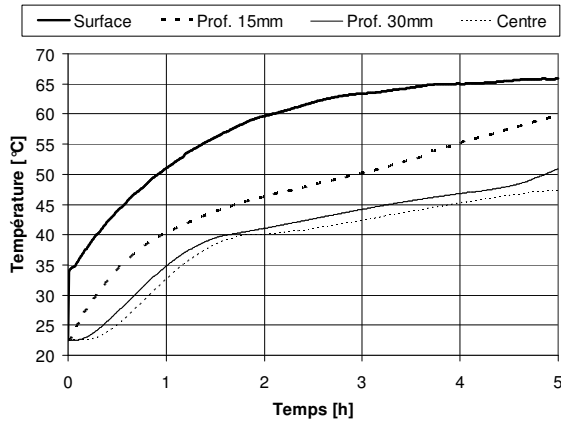
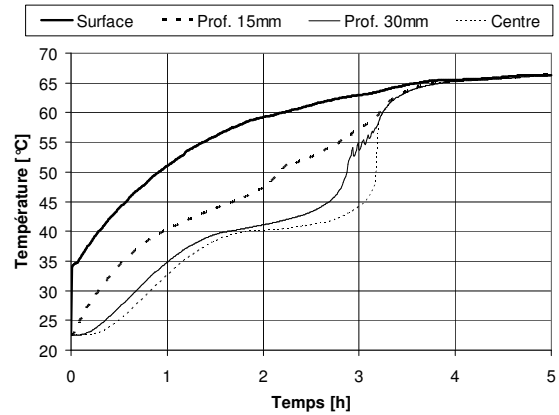


Figure 42 : Simulation avec une dilatation thermique en phase liquide  $0.00018 [1/\text{K}]$ .

Nous avons effectué des simulations en combinant les deux paramètres qui pourraient être les moins bien connus, à savoir la viscosité cinématique ainsi que la dilatation à l'état liquide. Les Figure 43 et Figure 44 montrent les résultats obtenus avec le modèle cuve/PCM 2006.



**Figure 43 : Simulation en combinaison de la viscosité maximale et de la dilatation thermique minimale. La fin du changement de phase a lieu après 5 heures 30.**



**Figure 44 : Simulation en combinaison de la viscosité minimale et de la dilatation thermique maximale.**

En combinant les valeurs extrêmes des deux paramètres, la simulation donne un temps nécessaire au changement de phase complet entre trois et cinq heures et demi après le début du test. Ce changement de phase a duré 3,5 heures dans les mesures en laboratoire. Pour rappel, la simulation n'utilisant pas la fonction du coefficient de conduction effectif (modèle cuve/PCM 2005) donnait un temps de transformation du matériau de 8 heures, soit plus du double.

Les vaguelettes observées sur les courbes des Figure 39 et Figure 41 sont générées par le manque de progression du type de calculs et non par une instabilité numérique. Effectivement, le passage de solide à liquide pour le calcul de la convection se fait de manière instantanée pour une couche et ainsi le coefficient de conduction effectif subit une forte augmentation entre deux pas de temps. Ce phénomène n'a pas d'incidence sur le bilan énergétique global et il est possible de réduire l'amplitude de ces oscillations en augmentant le nombre de couches de calculs dans le matériau.

Au vu de tous ces résultats, nous pouvons affirmer que le modèle est relativement robuste et qu'une mauvaise connaissance des valeurs des paramètres n'est pas un frein important à l'utilisation de ce modèle cuve/PCM 2006.

Les Tableaux 9 ci-dessous récapitulent les différents avantages et inconvénients de chaque méthode de calcul utilisée jusqu'ici pour le transfert de chaleur dans le PCM.

| <b>METHODE 1 : sans calculs ou ajustements du coefficient de conduction - 2005</b>   |                                 |
|--|---------------------------------|
| <b>AVANTAGES</b>   | <b>INCONVENIENTS</b>            |
| <ul style="list-style-type: none"> <li>- Pas de valeur à connaître sur la viscosité.</li> <li>- Pas de mesures à réaliser pour ajuster le coefficient de conduction lambda.</li> </ul> | Calculs éloignés de la réalité. |

| <b>METHODE 2 : ajustement du coefficient de conduction -2005</b>                                |   |
|---|---|
| <b>AVANTAGES</b>  | <b>INCONVENIENTS</b>  |
| <ul style="list-style-type: none"> <li>- Plus proche de la réalité que la méthode 1.</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Demande de faire des mesures afin d'ajuster le coefficient de conduction lambda.</li> <li>- A l'état liquide le coefficient lambda est fixe et plus élevé que la valeur réelle.</li> </ul> |

| <b>METHODE 3 : calculs de la convection interne (modèle cuve/PCM 2006)Figure 38</b>  |  |
|--|--|
| <b>AVANTAGES</b>   | <b>INCONVENIENTS</b>   |
| <ul style="list-style-type: none"> <li>- Proche de la réalité.</li> <li>- Valeur du lambda à l'état liquide identique à la théorie avec ajustement automatique en fonction du DT entre les 2 surfaces de la cavité considérée.</li> <li>- Ne nécessite pas de mesures au préalable.</li> <li>- Influence réduite des paramètres tels que la viscosité cinématique ou la dilatation thermique.</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Nécessite de connaître: la viscosité cinématique, la dilatation thermique.</li> </ul> |

**Tableaux 9 : Avantages et inconvénients des différentes méthodes de calculs du transfert de chaleur à l'intérieur du PCM.**

La convection interne dans le module de PCM est souvent négligée par souci de simplification. Cette manière de faire n'est envisageable que pour des PCM ayant une viscosité très grande où il n'y a pas de convection (état pâteux comme l'acétate de sodium avec du graphite). Pour les autres PCM, comme la paraffine, il est nécessaire de tenir compte de la convection interne en utilisant, par exemple, la méthode du coefficient de conduction effectif. En optant pour cette approche, nous avons montré qu'elle apporte une réelle amélioration des résultats.

## 5.2 COMPARAISON DU BILAN D'ÉNERGIE D'UNE CUVE

Dans le but de réaliser des bilans globaux d'énergie, nous avons effectué des comparaisons entre simulations et mesures expérimentales avec deux formes différentes de modules de PCM : sphère et cylindre.

## 5.3 LIT DE SPHÈRES

Les premières mesures à disposition ont été celles réalisées à l'EMPA [15] et concernent un lit de sphères Cristopia ST27 ( $\varnothing = 77$  [mm]) dans une cuve avec divers cas de tests charge/décharge (Figure 45).

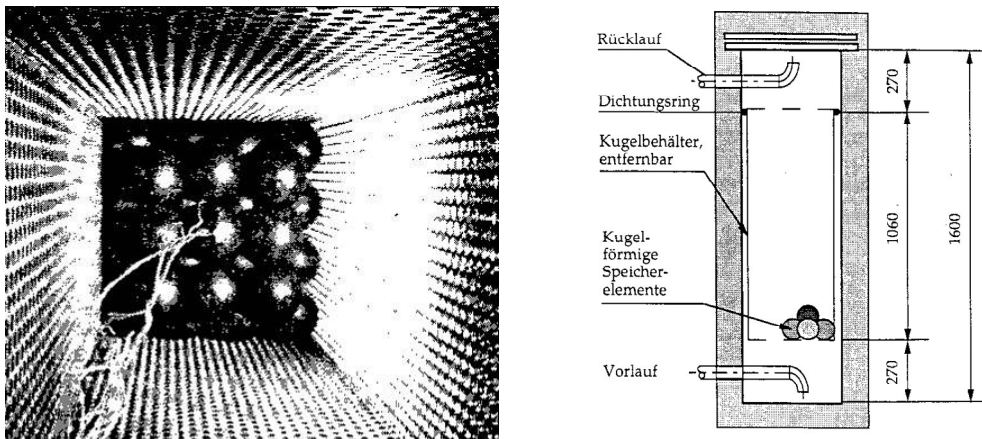


Figure 45 : Lit de Sphères Cristopia dans une cuve de section carrée.

Les simulations effectuées sont en conformité avec les résultats expérimentaux. Toutefois, il y a quelques différences au niveau des températures dans les sphères même (Figure 47). Cela n'a que peu d'influence sur le résultat final (Puissance fournie - Figure 46) dans la mesure où cette différence de température n'est pas trop importante.

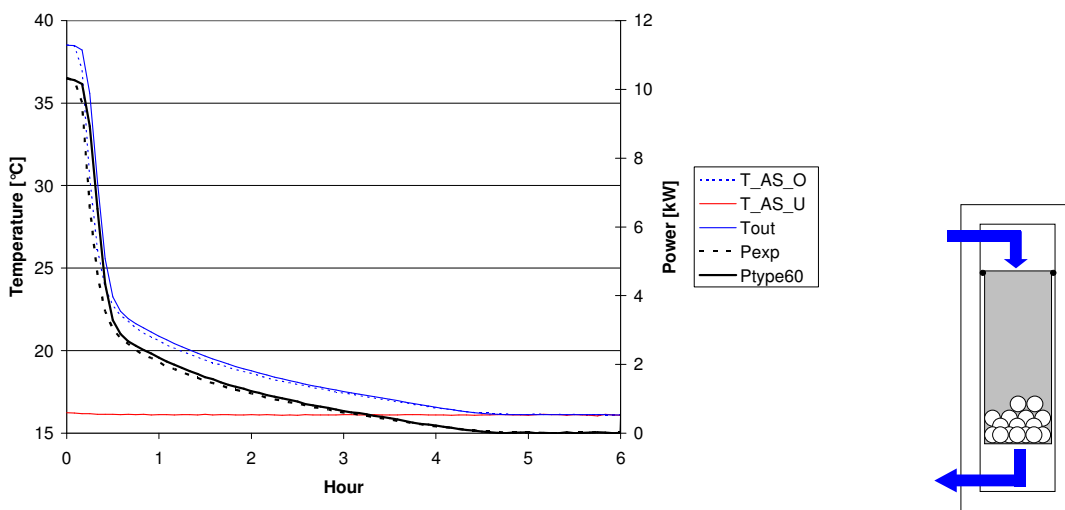


Figure 46 : Puissance lors de la décharge thermique de la cuve. Les lignes en pointillés sont des mesures alors que les lignes pleines sont le résultat de la simulation.

La Figure 46 montre les températures (rouge, vert et bleu) dans les sphères se situant dans la partie basse de la cuve (voir la ligne rouge du schéma de droite).

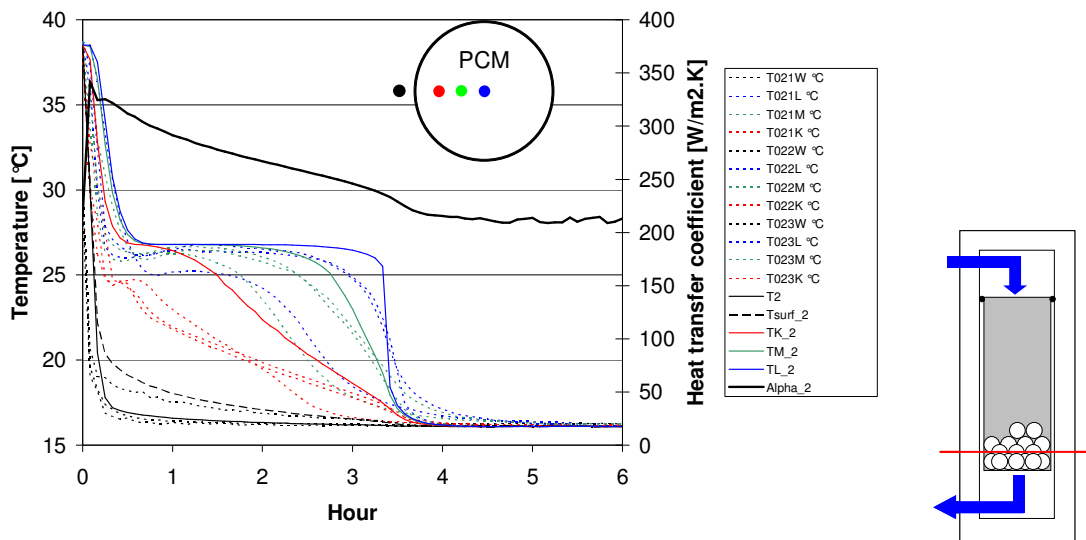


Figure 47 : Températures lors de la décharge thermique de la cuve. Les lignes en pointillés sont des mesures alors que les lignes pleines sont le résultat de la simulation.

Nous avons comparé également les résultats avec des résultats de simulations réalisées par l'équipe de Graz. Les deux modèles donnent des résultats similaires alors que le coefficient convectif d'échange thermique entre l'eau et le PCM est deux fois plus élevé dans l'un des deux modèles. Ceci s'explique par le fait que le transfert de chaleur dans notre cas se fait en série, par conduction et convection à l'intérieur du module de PCM et ensuite par convection entre le PCM et l'eau. Si l'un des deux transferts est important et l'autre faible, le transfert global sera limité par ce dernier. Dans le cas étudié, le maillon faible pour le transfert d'échange thermique est la conduction thermique du PCM lui-même. Le coefficient conduction thermique est compris entre 0.54 à 1.09 [W/m<sup>2</sup>.K] respectivement en phase liquide et solide. La différence des coefficients d'échange entre l'eau et le PCM utilisés dans les deux modèles, n'a que peu d'influence.

### 5.4 FORME CYLINDRIQUE

Nous avons également effectué des comparaisons entre simulations et mesures expérimentales sur des cylindres de paraffine réalisées en Autriche par l'université de Graz. Les mesures concernaient une cuve d'un mètre de haut pour 34,6 litres avec 7 cylindres de 50 mm de diamètre remplis de paraffine. Le premier test est une charge thermique de la cuve ( $T_{init}=33\text{ [}^\circ\text{C]}$ ) avec un débit d'eau de 100 [l/h] à 72 [°C]. Le deuxième test est une décharge thermique de la cuve ( $T_{init}=70\text{ [}^\circ\text{C]}$ ) avec un débit d'eau de 100 [l/h] à 50 [°C]. Les figures suivantes montrent les résultats.

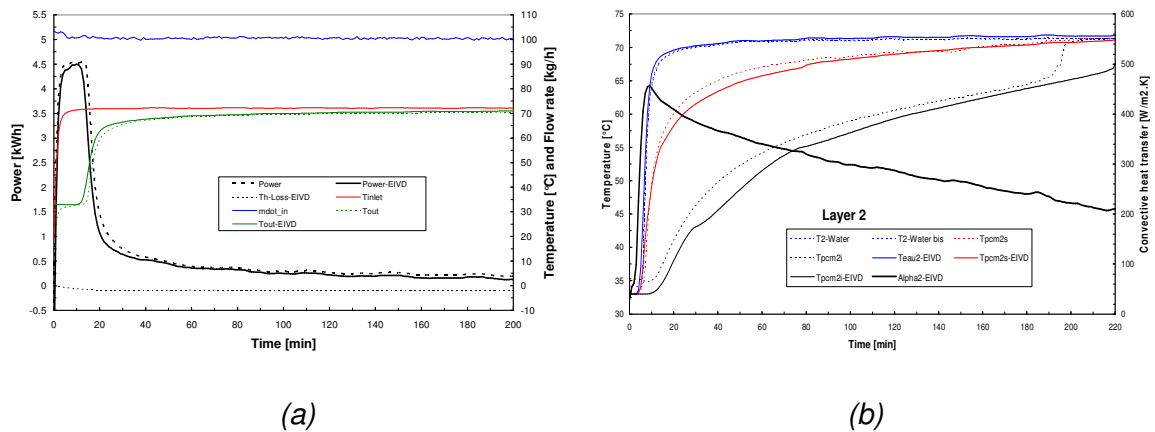


Figure 48 : (a) graphe de la puissance échangée et (b) graphe des températures et du coefficient convectif (eau/PCM) lors de la charge thermique de la cuve. Les lignes en pointillés sont des mesures alors que les lignes pleines sont le résultat de la simulation.

Nous sommes arrivés aux mêmes conclusions que pour le lit de sphères, à savoir qu'il est difficile de valider nos modèles avec un matériau ayant un faible coefficient de conduction thermique.

Il paraît donc important de réaliser ce même type de tests avec des PCM ayant un coefficient de conduction élevé tel que l'acétate de sodium additionné de graphite ou de la paraffine avec un élément conducteur à l'intérieur.

## 6 Comparaison avec des mesures réalisées par l'Université de GRAZ

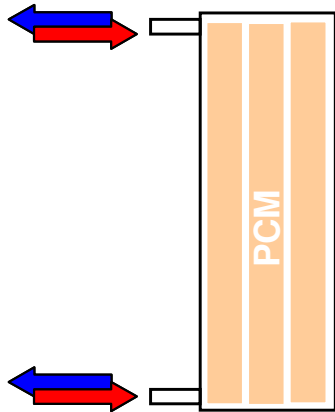


Figure 49 : Cuve de 35 litres avec 7 tubes contenant du PCM.

Le groupe de l'Université de Graz, participant à la tâche 32, a réalisé des mesures avec de l'acétate de sodium avec graphite dans une cuve de 35 litres avec 7 cylindres de PCM d'un diamètre de 55 [mm] chacun et d'une hauteur d'environ un mètre (Figure 49). Le pourcentage de PCM est de 35% en volume. Les essais ont été effectués avec un débit de 100 [l/h] et avec une température de 70 [°C] et 50 [°C] pour respectivement la charge et la décharge thermique de la cuve.

La comparaison entre la simulation et les mesures donne de bons résultats de la puissance délivrée lors de la charge thermique, comme le montre la Figure 50. Dans le cas de la décharge thermique, une différence un peu plus marquée est due principalement au phénomène de surfusion de l'acétate de sodium (Figure 51). Au moment du refroidissement, dès qu'une partie du PCM atteint le point de surfusion, tout le reste du matériau à changement de phase passera à l'état solide à la température normale de transformation. Dans le modèle numérique, la propagation de la cristallisation est instantanée et ce

phénomène de surfusion apparaît simultanément dans tout le PCM. Dans la réalité, cette propagation n'est pas instantanée et implique un décalage de l'apparition de ce phénomène aux différents endroits du matériau (Figure 52). Mais dans l'ensemble, le modèle numérique donne de bons résultats.

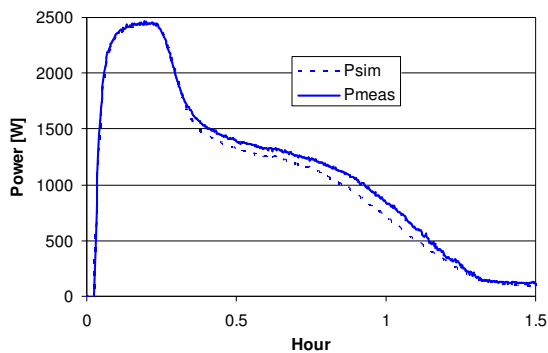


Figure 50 : Comparaison de la puissance de charge thermique mesures/simulation.

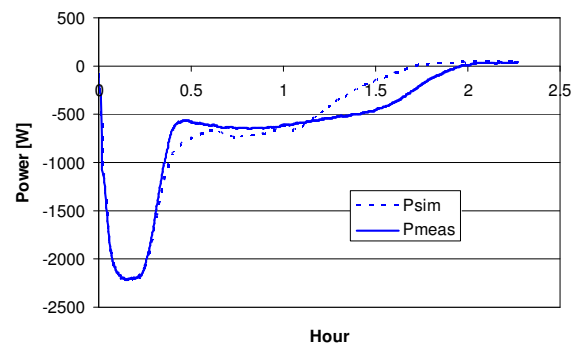


Figure 51 : Comparaison de la puissance de décharge thermique mesures/simulation.

Au cours de ces deux essais de charge et de décharge thermique, un pic de puissance apparaît durant les 15 premières minutes. Cela est dû à la forte différence de température entre celle de l'entrée d'eau et celle de la cuve avec le PCM. Vient ensuite un palier lié à la température, presque constante, lors du changement de phase du PCM.

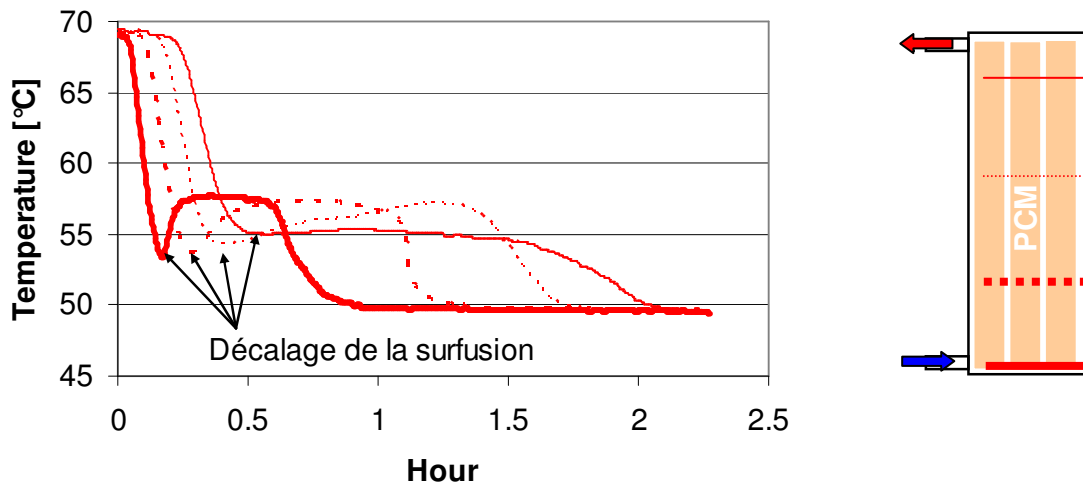


Figure 52 : Mesures de températures à différentes hauteurs dans le PCM lors de la décharge thermique où le phénomène de surfusion apparaît. Il y a surfusion dans le module alors qu'il y a déjà eu une première cristallisation à une extrémité (trait fort).

## 7 Module de PCM dans la cuve d'Arpège

Les matériaux à changement de phase ont été introduits dans des bouteilles en aluminium de 1,1 litre déjà employées durant les expériences précédentes (2005). Nous avons réalisé des tests de pression afin de s'assurer de la bonne étanchéité et de la tenue mécanique des bouteilles elles-mêmes. Un test de surpression de 3 bars relatifs à une température de 85 [°C] a été réalisé avec succès. Un volume d'air d'environ 0,1 litre dans la bouteille suffit à absorber l'augmentation de volume lors du changement de phase du PCM. Un test de dépression a montré un écrasement des bouteilles pour un  $\Delta P$  de 1 bar (Figure 53). Ces bouteilles ont été plongées dans la cuve où la pression est celle du circuit de chauffage. Il n'est donc pas possible d'avoir une installation Arpège+PCM pour un circuit de chauffage ayant une hauteur de colonne d'eau supérieure à 10 mètres. Durant nos essais, cette pression n'a pas dépassé 0,7 bar.

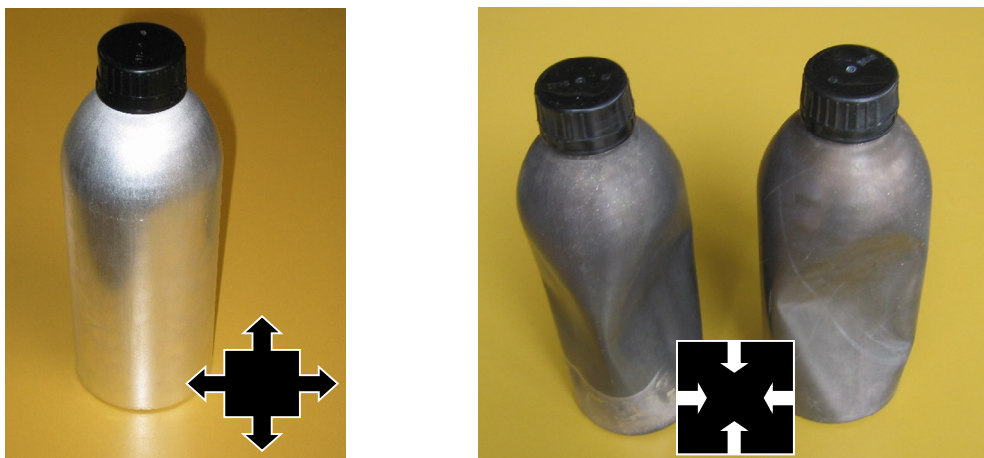
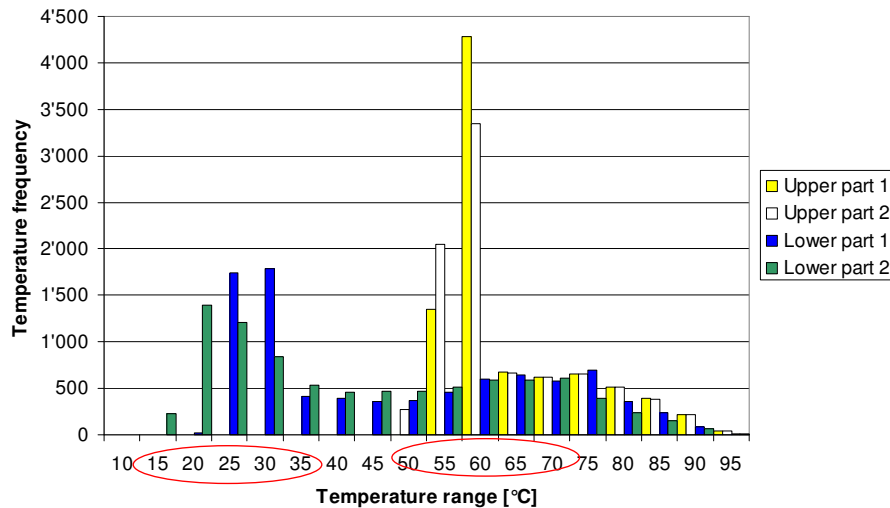


Figure 53 : Bouteilles testées à gauche avec une surpression de 3 bars et à droite avec une dépression de 1 bar.

Dans le cas des tests avec Arpège, les PCM choisis sont l'acétate de sodium avec du graphite pour la partie haute de la cuve et de la paraffine RT27 pour la partie basse. Différentes caractéristiques de ces matériaux sont données dans l'annexe (A1). Les températures de changement de phase sont respectivement de 58 et 27 [°C]. Ce choix est basé sur la fréquence des températures tout au long de l'année en fonction de la hauteur dans la cuve (Figure 54). Ces fréquences de température ont été obtenues par simulation sans utilisation de PCM. Ainsi, ces matériaux travailleront au mieux de leur capacité de stockage thermique.



**Figure 54 : Fréquence des températures dans la cuve selon la hauteur considérée.**

Dans la partie basse de la cuve, les fréquences les plus élevées sont comprises entre 20 et 30 [°C] alors que pour le haut de la cuve, le pic se situe aux alentours de 60 [°C].

La paraffine a été introduite dans les bouteilles en phase liquide. L'acétate de sodium avec le graphite a nécessité un remplissage des bouteilles par plusieurs cycles chauffage-tassement. En effet, ce matériau reste pâteux à l'état "liquide". Une fois "liquide" au-delà de 58 [°C], il a fallu le tasser pour en ajouter le plus possible. Après trois cycles chauffage-tassement, la densité obtenue était d'environ 1,2.

La mise en place des modules de PCM dans Arpège a nécessité l'installation d'une structure à l'intérieur même de la cuve. Un dispositif de maintien des bouteilles a également été prévu permettant d'accrocher les bouteilles dans la cuve et de laisser l'eau circuler autour de celles-ci de façon la plus libre possible (Figure 55 et Figure 56). 102 bouteilles ont été installées, 60 (acétate de sodium + graphite) dans la partie haute de la cuve et 42 (paraffine RT27) dans la partie basse. Le pourcentage de volume de PCM est de 21% en partie supérieure pour l'acétate de sodium et de 14% en partie inférieure pour la paraffine (Figure 55). Le pourcentage pour la totalité de la cuve est de 12%. Cette faible valeur est due aux différents échangeurs de chaleur présents dans cette cuve ainsi qu'à la chambre de combustion traversant la partie médiane de cette cuve.

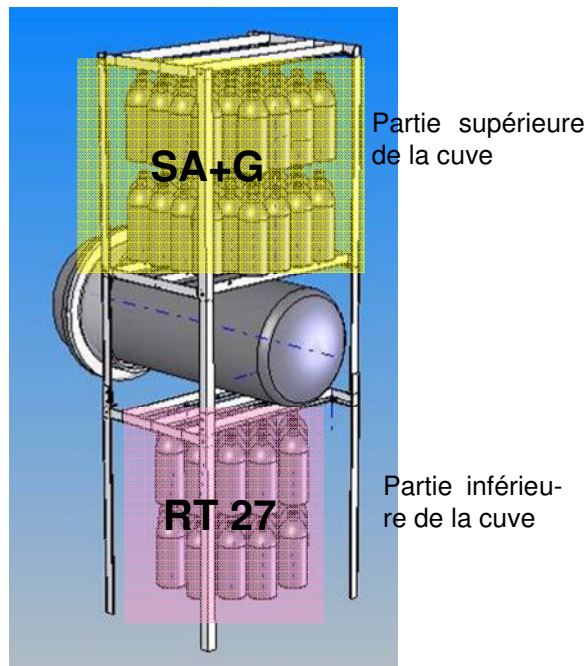


Figure 55 : Emplacement des bouteilles aluminium et leur structure porteuse.



Figure 56 : Système d'accrochage des bouteilles.

## 8 Mesures avec le banc de tests Arpège

Le banc de mesures existant a subi quelques transformations afin de prendre en compte l'utilisation de PCM dans l'installation Arpège et des variations de température dans le local d'expérimentations. Ce banc de test permet de reproduire n'importe quelle météorologie et n'importe quel bâtiment. Son principe de fonctionnement est basé sur une alternance toutes les minutes de mesures physiques et de simulations numériques. Les mesures enregistrées par le programme d'acquisition LABVIEW sont écrites dans un fichier qui est ensuite lu par le programme de simulation TRNSYS. Ce dernier écrit un fichier de résultats qui sera lu à son tour par LABVIEW. TRNSYS simule la météo, les capteurs solaires et le bâtiment alors que LABVIEW fournit les températures et les débits mesurés sur l'installation Arpège. La Figure 57 donne un aperçu des différentes grandeurs utilisées lors des tests ainsi que leur provenance physique ou numérique. La partie entourée en rouge représente l'installation solaire combinée Arpège.

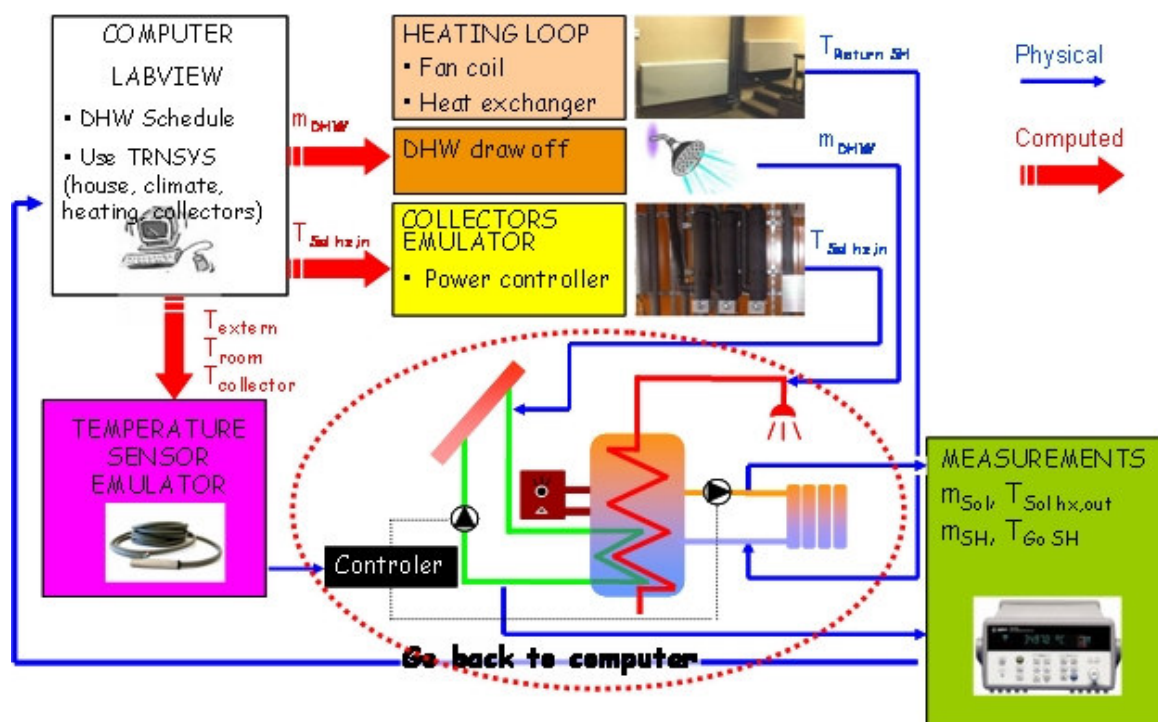


Figure 57 : Schéma de principe du cheminement et de l'utilisation des différentes variables physiques ou numériques du banc de tests Arpège.

Physiquement, les capteurs solaires sont émules par des corps de chauffe électriques avec une commande en puissance. La dissipation de l'énergie de chauffage, que l'on a dans un bâtiment réel, est réalisée grâce à des ventilo-convecteurs suivis d'un échangeur de chaleur à plaques branché sur l'eau froide du réseau. L'énergie dissipée ou fournie respectivement dans les circuits de chauffage ou solaire sont régulés en PID. Les soutirages d'eau chaude sanitaire sont enclenchés selon un schéma horaire prédéfini et sont au nombre de 8 par jour. La quantité d'énergie journalière d'eau chaude ainsi consommée est de 7,5 [kWh].

Afin que l'installation Arpège fonctionne comme si elle se trouvait dans une maison réelle, certaines sondes doivent être émules. Ces sondes de température utilisées par la régulation de l'installation solaire sont de type résistif ; leurs valeurs sont obtenues grâce à un modèle numérique qui permet de simuler l'évolution dynamique de la température intérieure du bâtiment, de la température des capteurs solaires et de la température extérieure.

### 8.1 CONDITIONS DES TESTS ECS+CHAUFFAGE

Deux types de tests sont prévus. Le premier est une succession de sept jours afin de tester le SCS (Solar Combi System) en mode chauffage et fourniture d'ECS. Deux périodes hivernales ont été choisies, l'une avec un ensoleillement moyen, l'autre avec un bon ensoleillement (Figure 58). Toutes deux proviennent du fichier météo de Zürich utilisé durant la tâche 26 de l'AIE. L'installation solaire est émulée avec 12 m<sup>2</sup> de capteurs pour une maison familiale d'un indice de dépense énergétique de 30 [kWh/(m<sup>2</sup>.an)]. La surface de la maison est de 140 m<sup>2</sup>. La demande en eau chaude sanitaire est de 7,5 [kWh/jour] à une température de 50 [°C].

Des tests de reproductibilité sans PCM ont été menés afin de s'assurer de la possibilité de comparaison avec ou sans PCM ainsi qu'avec des simulations. La Figure 59 montre les résultats obtenus. On observe une différence de 4 % sur la consommation de gaz due principalement à la différence de l'énergie de chauffage fournie pour le bâtiment. Le système de dissipation pour cette énergie de chauffage est influencé par la température du local où se situent les ventilo-convecteurs et également par la température de l'eau froide du réseau utilisée pour la dissipation de chaleur. Ces deux paramètres sont liés à la régulation de la ventilation du bâtiment de l'école et à la température extérieure. Toutefois, la reproductibilité est bonne et nous permet de mesurer des différences entre plusieurs configurations. Un bilan énergétique est également réalisé sur la cuve entre le début et la fin du test afin de prendre en compte la différence d'enthalpie de l'eau et des matériaux à changement de phase.

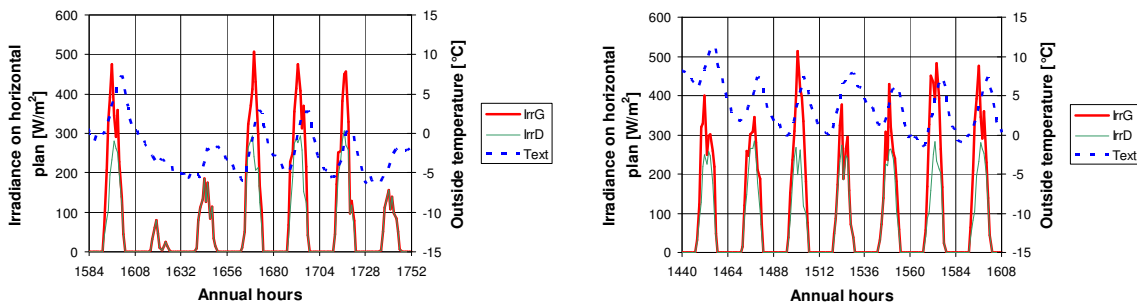


Figure 58 : Séquences météorologiques choisies : journées hivernales à Zürich, données Meteonorm (à gauche Météo 1, à droite Météo 2).

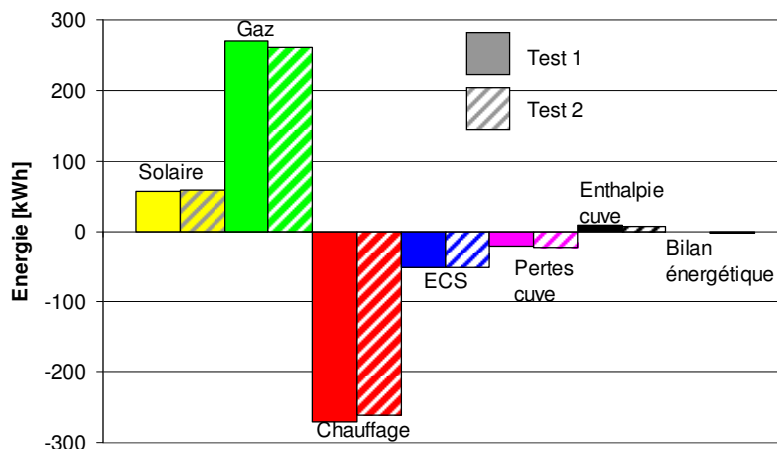


Figure 59 : Tests de reproductibilité (mesures sans PCM)

La Figure 60 et la Figure 61 montrent le calcul d'incertitude de la chaîne de mesures pour les deux météorologies choisies ceci pour chaque énergie entrant dans le calcul du bilan final. Les barres grisées représentent le pourcentage respectif de chaque énergie (gaz, solaire,...) par rapport à la totalité des énergies mises en jeu, selon la Figure 59. Par exemple, dans le cas de la météo 1 (test 1 dans la Figure 59), la part du gaz dans le bilan thermique total est de 40%. Les traits noirs montrent l'incertitude de mesures de chaque énergie correspondante.

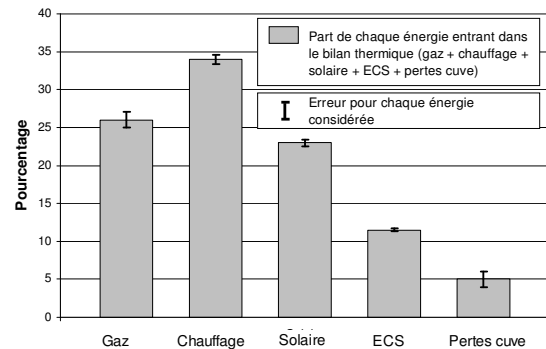
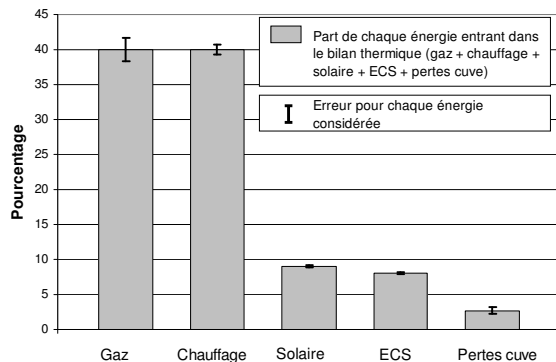


Figure 60 : Incertitudes de mesures pour la météo 1. Figure 61 : Incertitudes de mesures pour la météo 2.

Nous pouvons voir que le gaz est le vecteur énergétique où l'incertitude est la plus importante. Ceci est dû à la variation possible de son pouvoir calorifique supérieur au cours des essais et à la mesure de son débit. En tenant compte de ces incertitudes, on constate que la reproductibilité est garantie.

## 8.2 CONDITIONS DES TESTS ECS

Le deuxième type de tests effectués est un soutirage d'ECS quotidien de 1000 litres durant deux jours selon le profil de la Figure 62. Il permet de caractériser le comportement des PCM dans la partie haute de la cuve. La température d'eau froide est de 15 [°C] à l'entrée et celle de l'eau chaude en sortie est de 50 [°C].

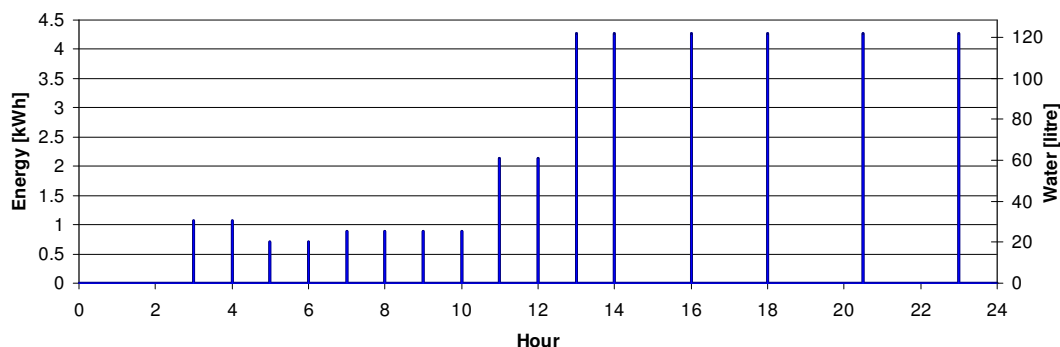


Figure 62 : Profil de soutirage d'ECS au cours d'une journée lors du test sanitaire : 1000 litres/jour.

### 8.3 COMPARAISONS MESURES/SIMULATIONS

Nous avons effectué des comparaisons entre les mesures et les simulations afin de valider le modèle de cuve ainsi que le modèle complet (cuve, capteurs solaires, régulation). Les graphiques de la Figure 63 montrent les différences de température dans la cuve sans PCM entre la simulation et les mesures. Nous voyons que le modèle numérique de la cuve est proche de la réalité.

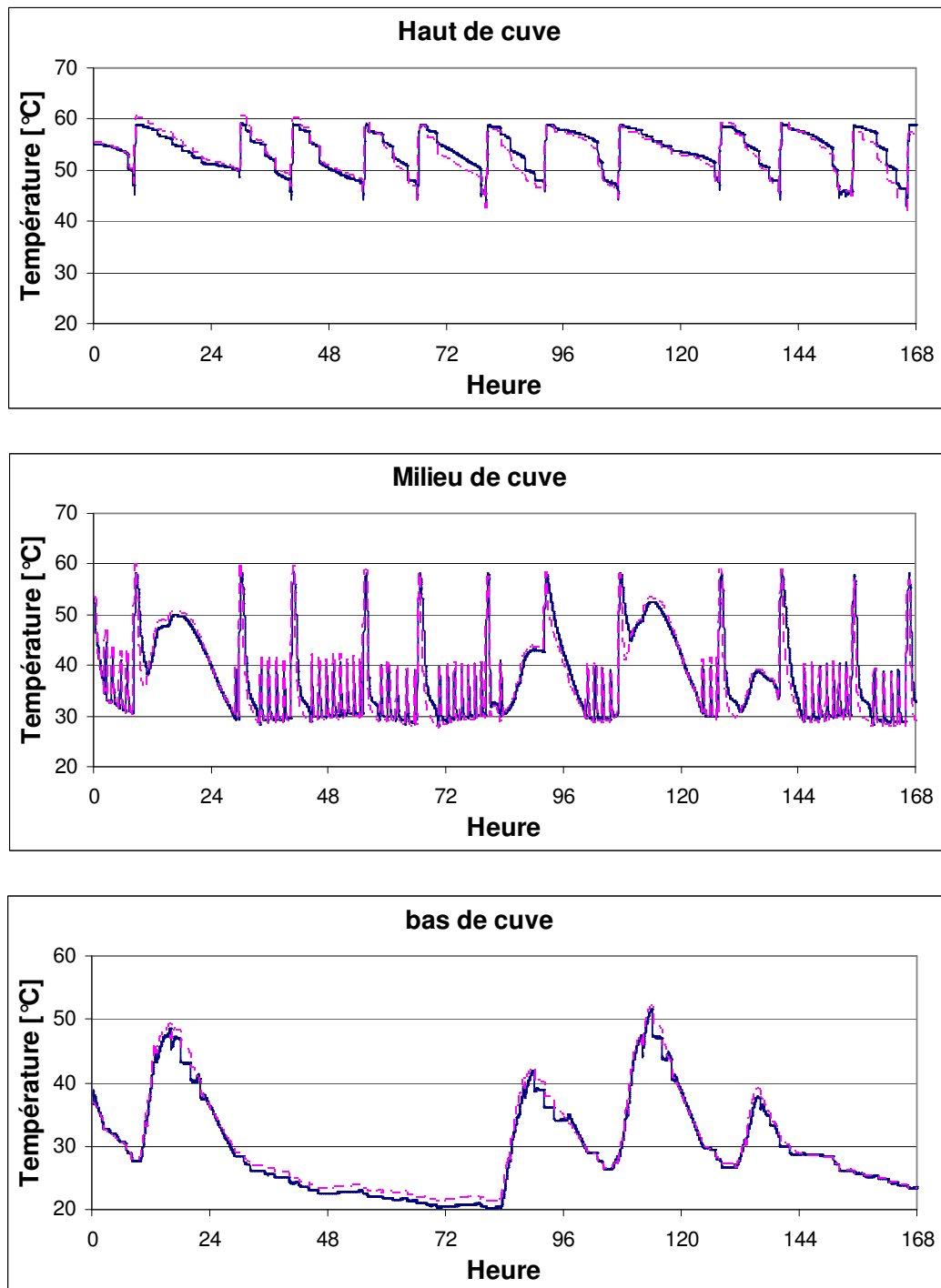


Figure 63 : Températures à différentes hauteurs dans la cuve sans PCM. Comparaisons entre les mesures (trait plein) et la simulation (pointillés). Durée de la comparaison : 7 jours (168 heures).

Nous avons fait de même avec la cuve remplie de PCM. Comme le montre les graphiques de la Figure 64, la comparaison est également bonne.

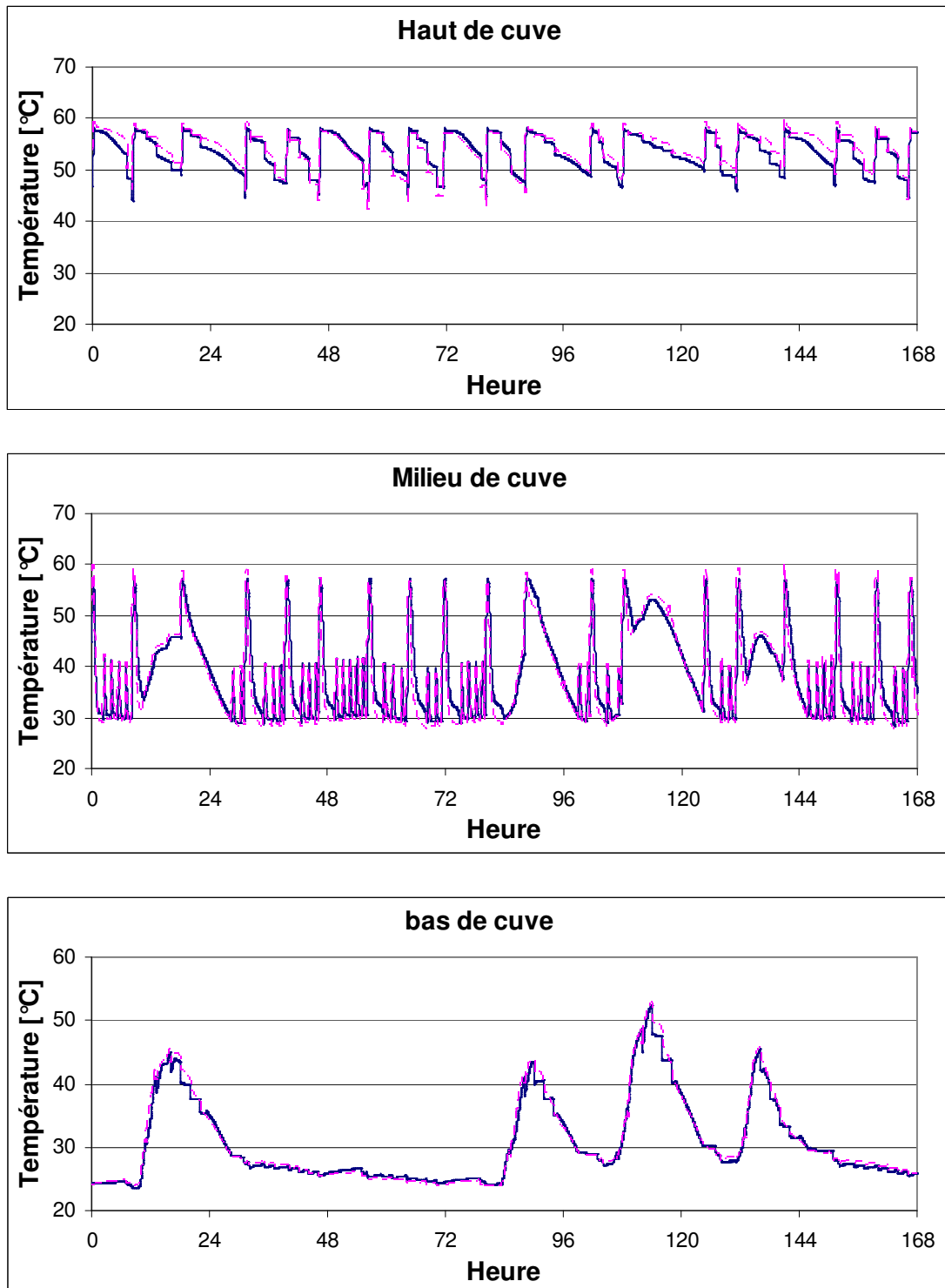


Figure 64 : Températures à différentes hauteurs dans la cuve avec PCM. Comparaisons entre les mesures (trait plein) et la simulation (pointillés). Durée de la comparaison : 7 jours (168 heures).

### 8.4 ANALYSE DES RÉSULTATS

En comparant les mesures avec et sans PCM, nous faisons les mêmes constatations pour le test de soutirage d'eau chaude sanitaire que pour les tests de 7 jours, à savoir un changement à propos des températures dans la cuve ainsi que du nombre de mises en route du brûleur (Figure 65). Ce dernier s'enclenche plus souvent lors de l'utilisation des matériaux à changement de phase (20 à 25% de plus). En effet, le transfert de chaleur n'est pas suffisamment rapide pour que les modules de PCM emmagasinent cet apport d'énergie. La courbe en trait plein de la Figure 65 permet de voir la période de transfert de chaleur entre l'eau et le PCM après l'enclenchement du brûleur où la température de l'eau descend jusqu'à la température de changement de phase du matériau (58 [°C]). Ce comportement va à l'encontre de l'effet escompté avec l'utilisation des matériaux à changement de phase. Ce même phénomène est visible lors d'un fort soutirage d'ECS où l'eau de la cuve se réchauffe après le soutirage. Aucune différence n'est visible au niveau du bilan thermique comme le montre la Figure 66. Sur ce graphique, la consommation de gaz, un peu plus importante avec des PCM, est liée à une demande en chauffage également plus élevée due aux conditions de tests légèrement différentes (température du local d'expérimentation).

Avec l'installation Arpège, l'utilisation de matériaux à changement de phase ne semble présenter aucun intérêt. Cette première conclusion devra être confirmée par des simulations annuelles (voir le chapitre à ce sujet).

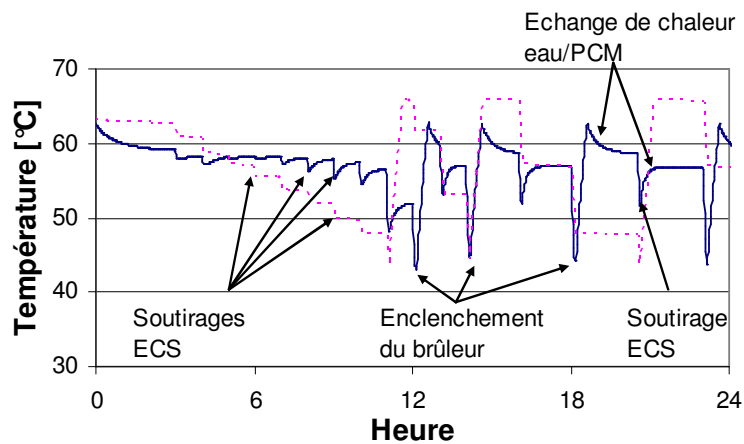


Figure 65 : Température dans le haut de la cuve (pointillés : sans PCM ; trait plein : avec PCM). Test de soutirage ECS

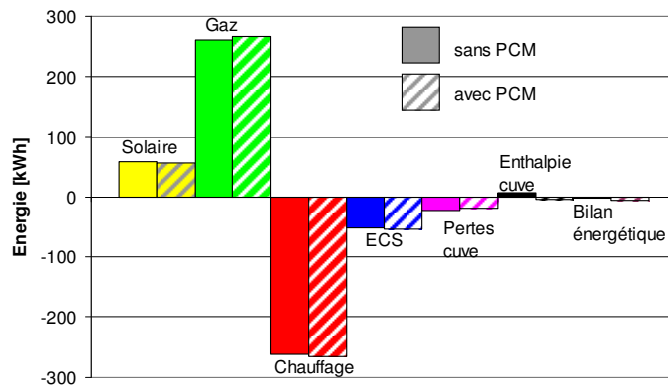


Figure 66 : Bilan énergétique sur 7 jours sans PCM (bâtons pleins) et avec PCM (bâtons hachurés).

## 9 Synthèses des simulations et comparaisons

Depuis l'année 2005, nous effectuons des comparaisons entre des mesures expérimentales et des simulations avec notre modèle numérique cuve/PCM (Figure 67).

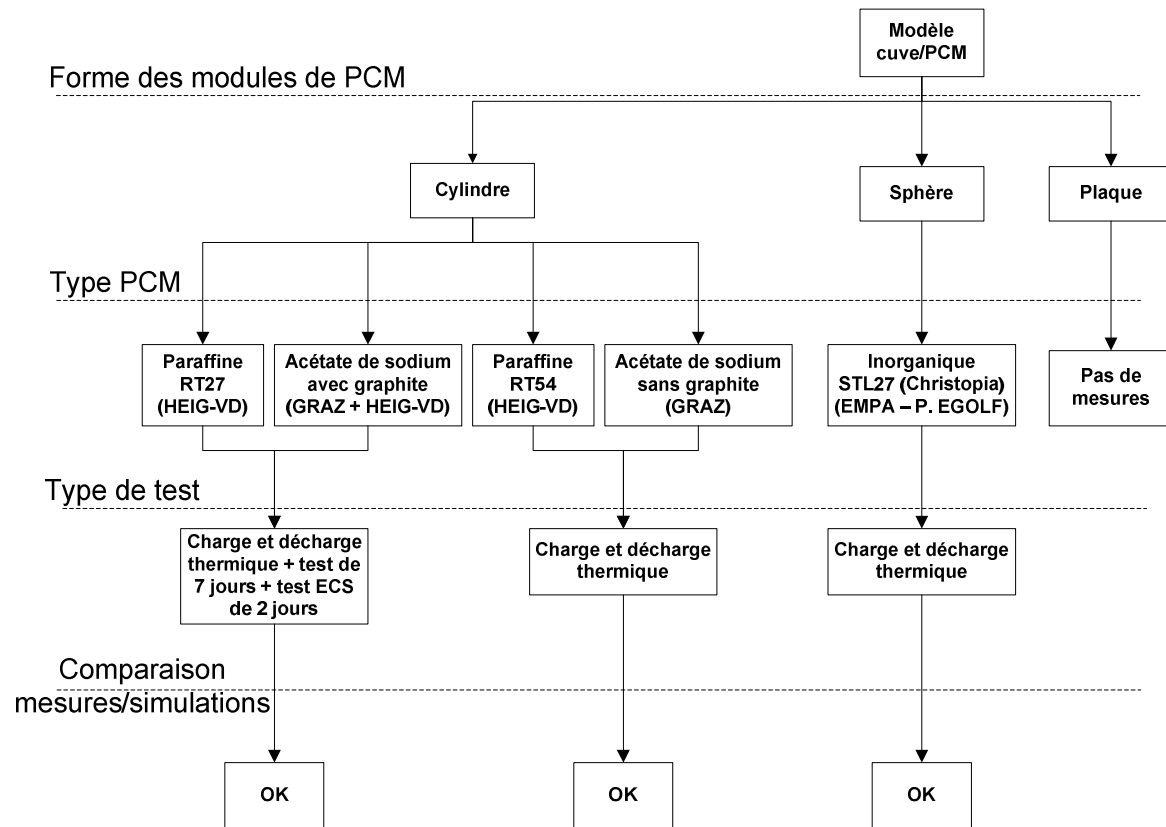


Figure 67 : Diagramme des comparaisons mesures/simulations effectuées avec le modèle Cuve/PCM

Ainsi, nous avons simulé un lit de sphères et plusieurs systèmes avec des modules de PCM de forme cylindrique. Nous avons également utilisé différents types de PCM, comme la paraffine et l'acétate de sodium, avec ou sans graphite. Nous avons contrôlé la puissance disponible lors de charge et de décharge ainsi que les températures situées dans le matériau à changement de phase. Enfin, nous avons comparé des mesures et des simulations avec un système solaire combiné durant des périodes de 7 jours et des périodes de 2 jours avec soutirage important d'eau chaude sanitaire. Dans tous ces cas, le modèle numérique a donné satisfaction. Il nous semble suffisamment fiable pour réaliser des simulations annuelles d'installations diverses.

## 10 Simulations annuelles d'Arpège

### 10.1 CRITÈRES DE COMPARAISONS

Dans un premier temps, nous avons effectué des simulations annuelles d'Arpège dans sa version d'origine à savoir une cuve de 824 litres pour 12 m<sup>2</sup> de capteurs solaires plans. Les paramètres et indicateurs choisis pour les simulations sont ceux utilisés dans la Tâche 26 de l'AIE dans le but d'utiliser au maximum l'expérience acquise à ce jour [16].

Pour analyser les performances énergétiques, on utilise les trois critères suivants, qui sont basés sur la fraction d'énergie épargnée, appelée en anglais Fractionnal Energy Saving (Fsav).

Le premier critère  $f_{sav,therm}$  ne fait intervenir que la notion de bilan thermique pur. Il compare la consommation en énergie fossile d'une installation solaire à celle d'une installation conventionnelle de référence. Il est ainsi possible de confronter n'importe quel type de système avec une seule et même référence.

$$f_{sav,therm} = 1 - \frac{Q_{aux,sol}}{Q_{aux,réf}} \quad [-] \quad (Q)$$

$Q_{aux,sol}$  = énergie fossile fournie à l'installation solaire.

$Q_{aux,réf}$  = énergie fossile fournie à l'installation conventionnelle de référence dépourvue d'apport solaire.

Un deuxième critère  $f_{sav,ext}$  prend en compte également l'énergie électrique nécessaire au fonctionnement de l'installation, pompe, régulation, vanne... Il est donné par :

$$f_{sav,ext} = 1 - \frac{Q_{total,sol}}{Q_{total,réf}} \quad [-] \quad (R)$$

$Q_{total,sol}$  = énergie fossile fournie à l'installation solaire additionnée à l'énergie électrique convertie en équivalent thermique (rendement de conversion 40%).

$Q_{total,réf}$  = énergie fossile fournie à l'installation conventionnelle de référence dépourvue d'apport solaire additionnée à l'énergie électrique convertie en équivalent thermique (rendement de conversion 40%).

Dans notre cas, cette consommation électrique est quasiment identique quelle que soit la configuration du système Arpège. Nous ne prendrons donc pas ce type de critère pour comparer les simulations avec Arpège.

Un troisième critère  $f_{si}$  (Fractional Savings Indicator) reprend les caractéristiques du critère précédent en incluant la notion de pénalité pour la non fourniture du confort thermique de l'eau chaude sanitaire ou du chauffage.

$$f_{si} = 1 - \frac{Q_{total,sol} - Q_{pénalité}}{Q_{total,réf}} \quad [-] \quad (S)$$

$Q_{pénalité}$  = énergie additionnelle de pénalité en cas de non fourniture du confort thermique.

## 10.2 RÉSULTATS

La demande en énergie de chauffage pour le bâtiment est de 4320 [kWh/an], soit 30 [kWh/(m<sup>2</sup>.an)]. La demande en ECS est de 3040 [kWh/an], soit 8,28 [kWh/jour]. La Figure 68 présente les premiers résultats avec les trois indicateurs suivants :

- la fraction d'énergie épargnée ( $f_{sav,therm}$ ),
- cette même fraction d'énergie épargnée avec pénalité pour la non fourniture d'énergie ( $f_{si}$ ),
- le nombre de surchauffes solaires (estivales) dans la cuve par an (*Tank overheating*).

Plusieurs cas de figures ont été simulés. Le chiffre entre parenthèses, dans la légende de la Figure 68, représente le pourcentage de PCM en volume par rapport au volume total de la cuve.

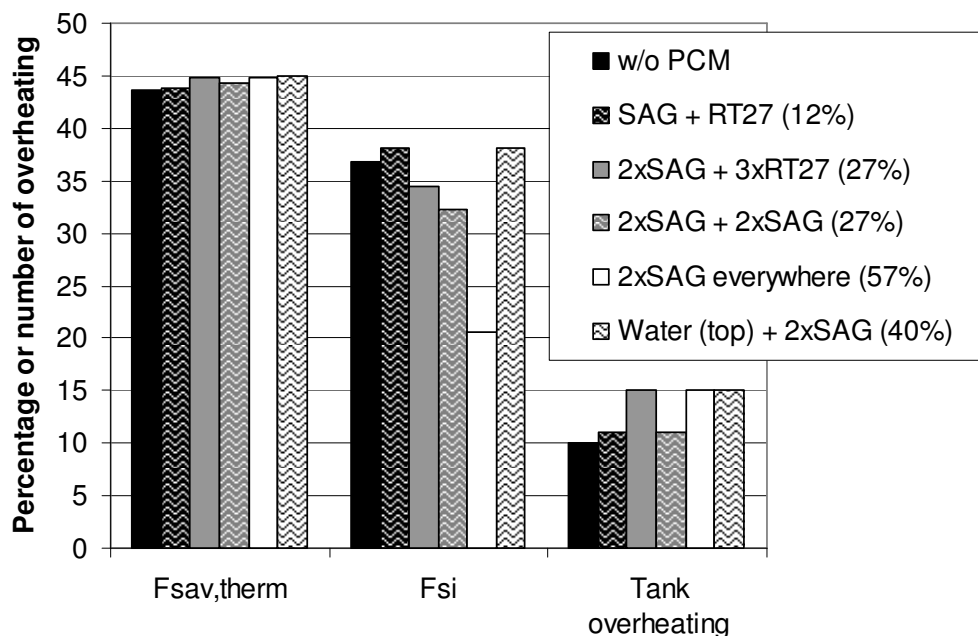


Figure 68 : Résultats de simulations annuelles pour l'installation solaire combinée Arpège avec différents types et pourcentages de PCM. Volume de la cuve : 824 litres.

- $f_{sav,therm}$  : la fraction d'énergie épargnée augmente légèrement avec l'utilisation des PCM (2 à 3 points).
- $f_{si}$  : avec le critère de non fourniture d'énergie  $f_{si}$  (pénalité), les performances diminuent fortement lorsque la part de PCM augmente. Ceci est dû à la pénalité pour la fourniture de l'eau chaude sanitaire. En augmentant la quantité de PCM dans la partie haute de la cuve, partie réservée pour l'ECS, la puissance à disposition diminue. En effet, comme nous l'avons vu dans le chapitre des mesures avec le banc de tests, le transfert de chaleur entre l'eau et le PCM n'est pas suffisamment bon pour restituer toute l'énergie contenue dans ces modules de matériaux à changement de phase. Seule, la dernière variante, barres blanches hachurées, se rapproche de la configuration sans PCM. Dans ce cas, il n'y a pas de PCM dans la partie haute de la cuve. Cette dernière est réservée pour la fourniture de l'eau chaude sanitaire. Les pénalités sont ainsi réduites et le critère Fsi remonte fortement.

- Tank overheating : le troisième critère, la surchauffe estivale est en augmentation avec l'utilisation des PCM. En été, la température de la cuve est souvent supérieure à la température changement de phase, ici 58 [°C]. Au-delà de cette température, le PCM ne stocke l'énergie qu'en chaleur sensible. La chaleur spécifique massique étant plus faible que celle de l'eau, il n'est pas intéressant d'introduire des PCM pour réduire la surchauffe estivale.

Pour les simulations, le Tableau 10 donne le type et la quantité de PCM dans la cuve en fonction de la hauteur.

| Légende Figure 68 | PCM haut de cuve                                       | PCM milieu de cuve                                       | PCM bas de cuve  | Abréviation dans la légende                                   |
|-------------------|--|--|--|---|
| Noir              | Pas de PCM   | Pas de PCM   | Pas de PCM   | w/o PCM   |
| Noir hachuré      | Acétate de sodium avec graphite<br>21% en partie haute | Pas de PCM   | Paraffine RT27<br>14% en partie basse                  | SAG+RT27<br>(valeurs utilisées dans les tests en laboratoire) |
| Gris              | Acétate de sodium avec graphite<br>42% en partie haute | Pas de PCM   | Paraffine RT27<br>42% en partie basse                  | 2xSAG+3xRT27  |
| Gris hachuré      | Acétate de sodium avec graphite<br>42% en partie haute | Pas de PCM   | Acétate de sodium avec graphite<br>42% en partie basse | 2xSAG+2xSAG   |
| Blanc             | Acétate de sodium avec graphite<br>57% en partie haute | Acétate de sodium avec graphite<br>57% en partie médiane | Acétate de sodium avec graphite<br>57% en partie basse | 2xSAG everywhere  |
| Blanc hachuré     | Pas de PCM   | Acétate de sodium avec graphite<br>57% en partie médiane | Acétate de sodium avec graphite<br>57% en partie basse | Water (top)<br>+2xSAG   |

**Tableau 10 : Explication des différentes couleurs des barres de la Figure 68.**

## 11 Diminution du volume de cuve et amélioration du transfert de chaleur

Un des intérêts possibles de l'utilisation des PCM est de diminuer le volume de stockage. Des simulations reprenant les mêmes paramètres que précédemment ont été effectuées en diminuant le volume de la cuve de 824 à 400 litres. La Figure 69 utilise les mêmes indicateurs que la Figure 68 avec en plus le nombre d'enclenchements du brûleur. Toutes les simulations avec du PCM ont été réalisées avec une quantité identique d'acétate de sodium avec graphite (50% en volume). Seul le transfert de chaleur entre les modules de PCM est différent afin de définir le paramètre prépondérant entre la convection dans l'eau ou la conduction dans le matériau. Effectivement, au chapitre précédent, nous avons vu que le point faible est cet échange de chaleur. L'augmentation du coefficient de convection dans l'eau pourrait être obtenue par exemple en ajoutant des ailettes sur le récipient de PCM. Selon le fabricant, le coefficient de conduction de l'acétate de sodium avec du graphite est de 4 [W/(m.K)]. Une valeur de 20 [W/(m.K)] (5 fois supérieure) correspond à celle d'une plaque en graphite imprégnée de PCM.

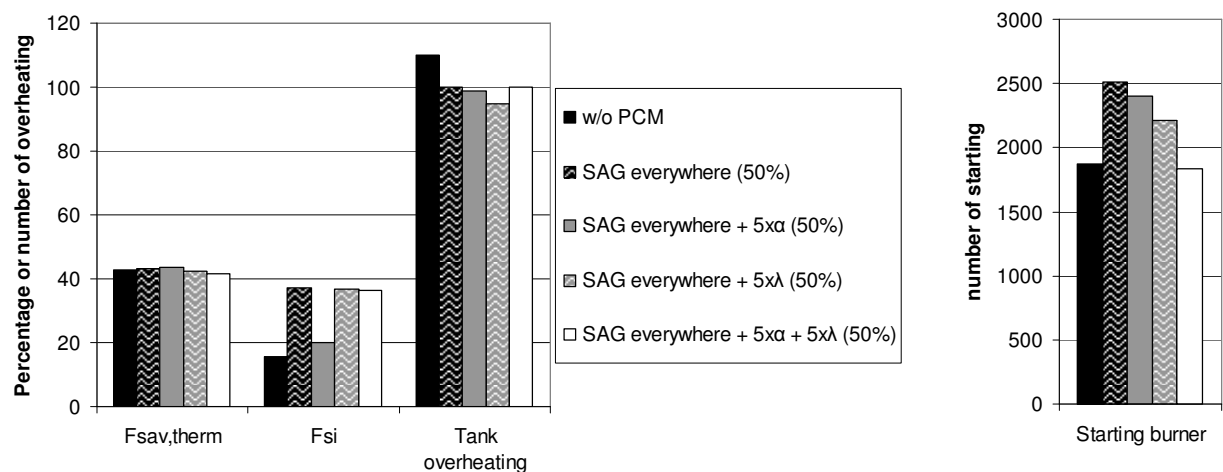


Figure 69 : Résultats de simulations annuelles pour l'installation solaire combinée Arpège avec différents transferts de chaleur. Volume de la cuve : 400 litres.

- $f_{sav,therm}$  : L'augmentation de la fraction d'énergie épargnée est faible, voire nulle en utilisant le PCM dans cette configuration.
- $f_{si}$  : Le critère de non fourniture d'énergie est très sensible par le fait du faible volume de la cuve (400 litres). Les pénalités dépendent essentiellement de l'enclenchement ou non du brûleur avant le soutirage d'eau chaude sanitaire. La présence ou non de PCM n'a que peu d'influence. Le critère  $f_{si}$  n'est donc pas significatif dans ce cas de figure.
- Tank overheating : Le nombre de surchauffes estivales diminue d'environ 10% avec l'utilisation de PCM mais reste très élevé. Ceci est dû au même comportement que pour les simulations avec une cuve de 824 litres (Figure 68). En été, la température de la cuve est supérieure à la température de changement de phase (58 [°C]). Le PCM travaille peu souvent dans la plage de températures intéressantes, ne profitant pas du changement de phase.

- Starting burner : Le nombre d'enclenchements du brûleur (partie droite de la Figure 69) augmente avec l'emploi des matériaux à changement de phase. Ce phénomène est lié à la rapidité insuffisante du transfert de chaleur comme nous l'avons vu au chapitre 8.4 et Figure 65. En augmentant le coefficient global de transfert de chaleur, ce critère évolue favorablement, sans permettre toutefois d'avoir un nombre d'enclenchements du brûleur inférieur à celui d'une cuve remplie uniquement avec de l'eau.

Le Tableau 11 présente les différents cas de figure simulés pour le transfert de chaleur.

| Légende Figure 69 | Coefficient de convection dans l'eau    | Coefficient de conduction dans le PCM   | Abréviation dans la légende                |
|-------------------|---|---|--|
| Noir              | Pas de PCM                              | Pas de PCM                              | w/o PCM                                    |
| Noir hachuré      | Conforme aux calculs théoriques         | Conforme aux calculs théoriques         | SAG everywhere                             |
| gris              | 5 fois supérieur aux calculs théoriques | Conforme aux calculs théoriques         | SAG everywhere +5x $\alpha$                |
| Gris hachuré      | Conforme aux calculs théoriques         | 5 fois supérieur aux calculs théoriques | SAG everywhere +5x $\lambda$               |
| Blanc             | 5 fois supérieur aux calculs théoriques | 5 fois supérieur aux calculs théoriques | SAG everywhere +5x $\alpha$ + 5x $\lambda$ |

**Tableau 11 : Explication des différentes couleurs des barres de la Figure 69.**

## 12 Analyse environnementale par écobilan

Cette section décrit l'analyse des impacts environnementaux générés par l'utilisation d'un PCM et de son récipient dans un combi-système. Le but étant de déterminer la part des impacts de ces éléments par rapport aux impacts globaux des matériaux constituant le combi-système et de l'énergie d'appoint consommée durant la durée de vie de l'installation.

### 12.1 SYSTÈME ANALYSÉ

Pour cette étude, nous avons analysé les impacts environnementaux du combi-système Arpège dont la cuve est remplie de modules de PCM, constitués de bouteilles en aluminium contenant de la paraffine. Pour cette installation Arpège, les simulations ont été réalisées avec 300 kg de PCM. Le fait d'utiliser de l'aluminium pour les récipients, n'est pas optimum du point de vue environnemental ; mais ce choix est dicté par le besoin d'avoir un matériau à haute conductibilité thermique afin d'améliorer les transferts thermiques entre le PCM et l'eau de la cuve. Cette analyse permettra de savoir quelle est la part des impacts du PCM et du récipient par rapport à toute l'installation Arpège.

Cette étude inclut également une analyse des impacts en tenant compte des impacts générés par l'énergie d'appoint nécessaire à Arpège durant son utilisation dans un bâtiment type, à savoir celui étudié dans le cas de la Tâche 26 et repris dans cette Tâche 32.

### 12.2 MÉTHODOLOGIE

Une analyse par écobilan est une approche qui considère le cycle de vie d'un système analysé. Il faut considérer les différentes phases du cycle de vie des divers matériaux constituant l'objet analysé. Il faut ainsi tenir compte des impacts environnementaux générés par les matériaux constituant Arpège, mais également les impacts générés par l'énergie consommée durant sa phase d'utilisation.

Pour cette analyse par écobilan, les valeurs d'impacts des matériaux et des énergies sont tirées de la base de données Ecoinvent. Il existe de nombreux indicateurs pouvant être utilisés pour faire un écobilan. Afin de rester synthétique, il a été décidé de se concentrer sur deux indicateurs reconnus unanimement au niveau international et qui sont liés à des préoccupations majeures de notre société actuelle. Le premier concerne l'épuisement des ressources non-renouvelables et le second est lié à l'effet de serre. Ces indicateurs sont :

- **NRE** (Non-Renewable Energy) : Cet indicateur correspond à la consommation d'énergie primaire non renouvelable et s'exprime en [MJ]. Cet indicateur donne des informations sur l'épuisement des ressources d'énergies non-renouvelables.
- **GWP** (Global Warming Potential) : Cet indicateur correspond aux émissions de gaz à effet de serre (CO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>O, CH<sub>4</sub>, H<sub>2</sub>, ...) en tenant compte de leur contribution relative. Comme la référence est le CO<sub>2</sub>, les valeurs d'impacts sont exprimées en [kg CO<sub>2</sub>-eq].

Les résultats qui seront présentés plus loin seront donc toujours exprimés pour ces deux indicateurs en parallèle.

### 12.2.1 Système Arpège

Pour cette étude, nous avons analysé les éléments suivants:

- le combi-système Arpège
- le PCM (paraffine)
- le récipient en aluminium contenant le PCM et son bouchon.



Figure 70 Arpège (à gauche), le récipient en aluminium utilisé pour contenir le PCM (à droite).

Nous avons décomposé le système analysé en catégories principales:

- Paraffine + récipient (PCM)
- Capteur plan vitré (Collector)
- Circuit solaire (Collecteur loop)
- Circuit d'eau chaude sanitaire (DHW loop)
- Circuit de chauffage (Heating Loop)
- Brûleur (Auxiliary)
- Cuve de stockage (Storage)

Le Tableau 12 donne pour chaque élément, le matériau et le poids des constituants.

| Catégorie                        | Matériaux       | Poids [kg] |
|----------------------------------|-----------------|------------|
| <b>Storage (830 l)</b>           |                 |            |
| Tank                             | Steel           | 223.73     |
| Water                            | Water           | 830.00     |
| Tube                             | Steel           | 10.91      |
| Insulation                       | Urea            | 4.83       |
| <b>Auxiliary (oil/gas)</b>       |                 |            |
| Burner                           | Mainly alu.     | 10.00      |
| Combustion chamber               | Stainless steel | 65.81      |
| Door                             | Steel           | 6.75       |
| Insulation                       | Rockwool        | 0.44       |
| Flue                             | PVDF            | 10.35      |
| <b>Heating loop</b>              |                 |            |
| Expansion bottle                 | Steel           | 16.00      |
| SH pumps+valve                   | Copper alloy    | 12.00      |
| <b>DHW loop</b>                  |                 |            |
| DHW HX                           | Stainless steel | 22.75      |
| <b>Collector loop</b>            |                 |            |
| Expansion bottle                 | Steel           | 28.00      |
| Solar pump+tube                  | Copper alloy    | 7.50       |
| Solar HX                         | Copper          | 17.71      |
| Tube                             | Plastic/Silicon | 5.76       |
| Insulation                       | PVDF            | 1.76       |
| Antifreeze                       | Propylen glycol | 17.89      |
| Antifreeze                       | Propylen glycol | 5.53       |
| <b>Collector 12m<sup>2</sup></b> |                 |            |
| Glass                            |                 | 100.50     |
| Absorber                         | Stainless steel | 115.66     |
| Insulation                       | Glass fiber     | 54.25      |
| Rubber                           | Rubber          | 15.00      |
| Frame                            | Aluminium       | 65.70      |
| <b>Other</b>                     |                 |            |
| Frontal cover                    | Steel           | 24.50      |
| Lateral cover                    | Steel           | 18.00      |
| Insulation (Capotage)            | Glass fiber     | 0.97       |
| Regulation                       | Varied          | 5.00       |
| Tank for cond. residue           | PVC + PP        | 1.00       |
|                                  | Gravel          | 2.00       |
| Packing                          | Cardboard       | 12.00      |
| Fix HX                           | Aluminium       | 3.24       |
| Paint                            | Paint for metal | 2.50       |
| Other tube                       | Copper alloy    | 11.50      |
| <b>PCM (300 kilos)</b>           |                 |            |
| Paraffine                        | Paraffine       | 300.0      |
| Bottle                           | Aluminium       | 27.0       |
| Caps                             | PP              | 3.0        |

**Tableau 12 : Liste des constituants du combi-système Arpège avec PCM.**

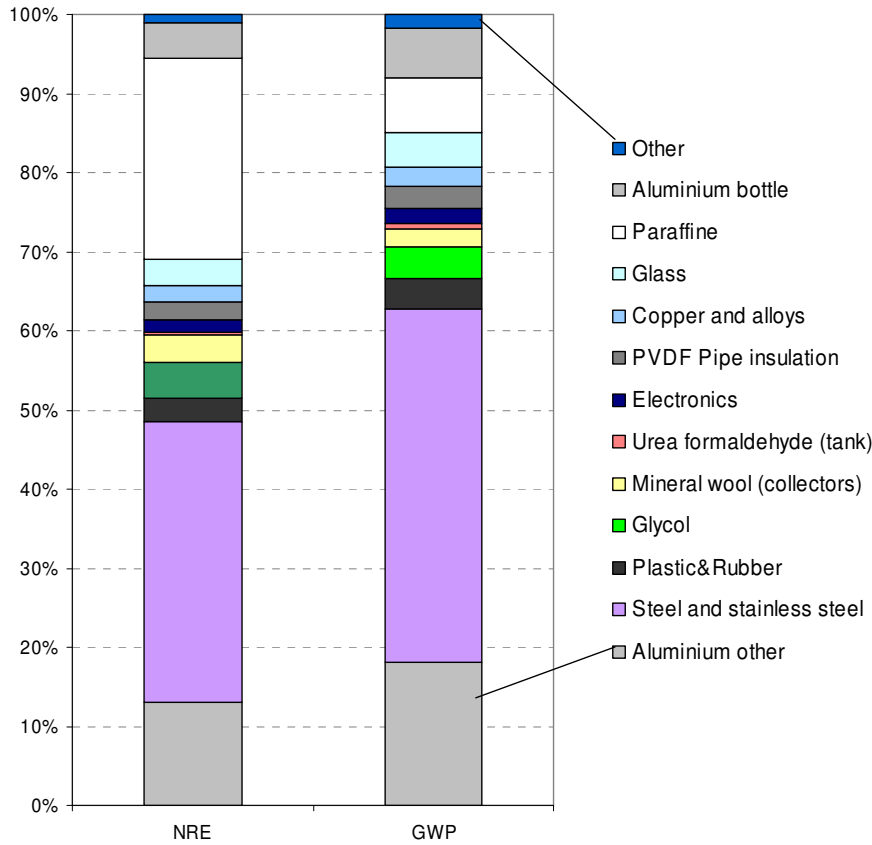
### 12.2.2 Bâtiment étudié

Concernant la consommation d'énergie, nous avons repris le bâtiment étudié dans la Task AIE 26 et dont les besoins en énergies annuelles sont :

- Electricité pour l'installation de chauffage [kWh] : 549
- Energie utile de chauffage (appoint) [kWh] : 9368
- Couverture solaire [kWh] : 3969

### 12.3 RÉSULTATS

La Figure 71 donne la proportion des impacts par matériaux du système Arpège avec PCM et les bouteilles en aluminium.



**Figure 71 Proportion des impacts des différents matériaux composants le combi-système Arpège avec PCM.**

On constate que la part du PCM n'est pas négligeable. On a par indicateur les valeurs suivantes :

| Indicateur | PCM (paraffine)<br>[% du total] | Récepteur (aluminium)<br>[% du total] | PCM + Récepteur<br>[% du total] |
|------------|---------------------------------|---------------------------------------|---------------------------------|
| NRE        | 25.4                            | 4.5                                   | 29.8                            |
| GWP        | 7.1                             | 6.2                                   | 13.2                            |

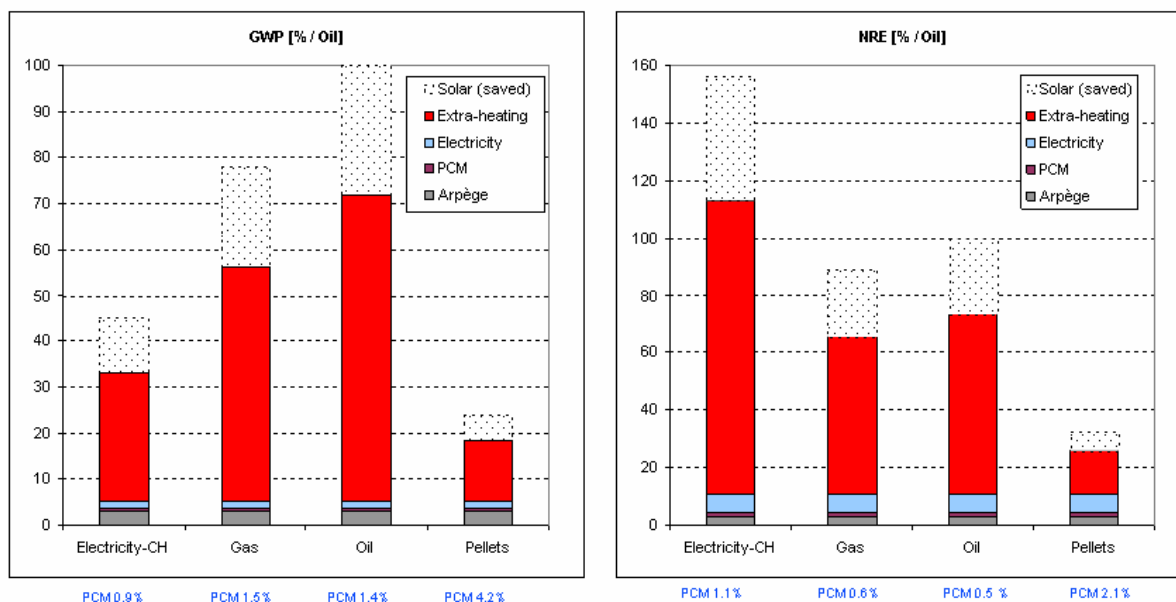
Les impacts environnementaux du PCM et du récepteur semblent importants quand ils sont comparés aux impacts des autres matériaux constituant Arpège. Toutefois, il ne faut pas oublier que, durant le cycle de vie du combi-système, de l'énergie d'appoint est consommée, qu'elle génère également des impacts dont il faut tenir compte.

### 12.3.1 Système complet : Matériaux et Energie

Pour la prise en compte de l'énergie d'appoint consommée pendant la phase d'utilisation du système, nous avons comparé différents vecteurs énergétiques, soit :

- Electricité avec le mix Suisse (Electricity-CH)
- Chaudière à gaz avec condensation (Gas)
- Chaudière à mazout sans condensation (Oil)
- Le pellet (Pellets)

Pour le calcul des impacts incluant l'énergie consommée durant la phase d'utilisation, une durée de vie de l'installation de 20 ans a été considérée. Sur cette base, nous obtenons les résultats présentés dans la Figure 72.



**Figure 72 Proportion des impacts GWP et NRE pour différentes énergies d'appoint. Les résultats sont exprimés en prenant une valeur de 100% pour la variante avec énergie d'appoint au mazout sans le solaire. Les valeurs PCM X%, indiquent la part des impacts du PCM par rapport à l'ensemble des impacts (sans le solaire).**

Dans la Figure 72, les résultats ont été regroupés en 4 catégories :

- Energie d'appoint (Extra-heating)
- Electricité pour Arpège (Electricity)
- PCM qui inclut la paraffine et la bouteille (PCM)
- Arpège qui inclut tous les matériaux de l'installation sans PCM (Arpège)

Dans la Figure 72, la zone en pointillé indique les impacts de l'énergie d'appoint, qui seraient générés sans installation solaire. Ainsi les impacts réellement émis sont représentés dans la figure uniquement par les empilements opaques.

Les résultats de la Figure 72 indiquent que la plus grande part des impacts est liée à la consommation d'énergie d'appoint. La part liée aux PCM ne représente qu'un faible impact (quelques pourcents) sur l'ensemble des impacts liés aux matériaux et à l'énergie d'appoint consommée. Pour cette étude, nous avons été prudents en prenant une durée de vie de l'installation de 20 ans. Si cette durée de vie augmente, alors la part des matériaux de fabrication réduira en valeur relative. En effet, les matériaux ne sont comptabilisés qu'une fois, alors que plus la durée de vie augmente et plus la part liée à l'énergie d'appoint nécessaire en phase d'utilisation augmentera proportionnellement à cette durée de vie.

Dans la configuration étudiée, la réduction des impacts liée à l'économie d'énergie engendrée par l'utilisation de PCM est du même ordre de grandeur que l'augmentation des impacts lié à l'ajout du PCM dans le système (4%). Nous avons supposé que la durée de vie du PCM était également de 20 ans. Cette valeur est peut-être surestimée. Toutefois, comme les impacts du PCM sont faibles, un doublement ou triplement des ces impacts, restera faible vis-à-vis des impacts globaux, sauf dans le cas de l'utilisation de pellets comme énergie d'appoint. Dans ce cas, les impacts du changement de PCM seraient de l'ordre de 8% des impacts globaux.

Dans les résultats présentés ci-dessus, les impacts liés aux matériaux de construction utilisés pour le bâtiment analysé n'ont pas été inclus. Pour ce genre de bâtiment, la part des matériaux de construction représentent les valeurs suivantes [19]:

- GWP : environ 20% des impacts totaux (matériaux + énergie)
- NRE : environ 15% des impacts totaux (matériaux + énergie)

Par conséquent, en considérant les impacts globaux du bâtiment (matériaux de construction, système de chauffage et PCM), les impacts du PCM peuvent être considérés comme très faibles.

Toutefois, cette étude n'a considéré qu'un PCM fait de paraffine car ses valeurs d'impacts étaient disponibles. Il faudrait répéter l'analyse avec un PCM du type sodium-acétate, dont les performances énergétiques sont plus intéressantes. Malheureusement, ces données ne sont pas encore disponibles.

## 13 Conclusions et perspectives

Les tests effectués avec le système solaire combiné Arpège avaient pour but final de comparer les performances de cette installation avec et sans utilisation de PCM pour évaluer les performances du stockage par chaleur latente.

Le modèle numérique développé au laboratoire a permis de réaliser des simulations pour des modules de PCM de différentes formes (cylindres et plaques verticaux, lits de sphères) immergés dans la cuve du stock d'Arpège. Ce modèle numérique détaillé, basé sur une représentation en couche (peau d'oignon), permet de modéliser dynamiquement l'évolution des transferts thermiques dans le PCM et entre le PCM et l'eau de la cuve. Ce modèle prend en considération l'hystérésis du PCM, la surfusion et la convection du PCM en phase liquide.

La validation du modèle a été obtenue grâce à une campagne de mesures qui a permis de visualiser l'évolution spatiale et temporelle de la température dans des modules de PCM (paraffine et sodium acétate avec graphite) soumis à différentes contraintes de températures. Sans la prise en considération de la convection interne, les résultats expérimentaux ont montré une grande différence par rapport aux simulations. Il est donc indispensable de prendre en compte la convection interne du PCM pour que le modèle soit représentatif de la réalité. Les résultats obtenus ont montré la bonne qualité du modèle numérique et ont souligné l'importance de ne pas négliger la convection interne dans les PCM en phase liquide.

Le modèle numérique, implémenté dans un modèle existant du logiciel TRNSYS, a été comparé avec des mesures expérimentales de différentes configurations de PCM. Il a donné entière satisfaction. Ce modèle est également suffisamment paramétrable pour être employé par n'importe quel utilisateur TRNSYS. Toutes les personnes intéressées peuvent nous contacter afin d'obtenir le code ainsi que les informations nécessaires à son emploi.

La seconde étape principale de ce projet concernait l'utilisation de PCM dans le système solaire combiné Arpège. Les tests de l'installation Arpège faisant intervenir un comportement plus complexe que ceux étudiés jusque-là, une validation du modèle numérique a également été effectuée. Plusieurs séries de mesures de 7 jours consécutifs, avec différents climats et soutirages, ont été effectuées avec Arpège. Ces résultats expérimentaux ont également permis de valider notre modèle numérique. Le modèle numérique actuel est donc suffisamment fiable pour effectuer des simulations annuelles sans nécessiter de mesures expérimentales supplémentaires.

Nous avons ainsi réalisé des simulations annuelles sur la base de l'installation solaire Arpège. Les critères de comparaisons et les paramètres de simulations ont été repris de la Tâche 26. Les résultats ont montré qu'il est difficile d'améliorer les performances de l'installation solaire Arpège en y introduisant des modules de PCM. Ceci s'explique par le fait que la conception de cette installation solaire a été réalisée sans tenir compte du comportement des PCM. La place à disposition pour installer des modules de PCM n'était pas aussi importante que souhaitée. Effectivement, différents échangeurs de chaleur sont présents dans la cuve même et limitent le volume disponible. De plus, le transfert de chaleur entre l'eau et le PCM n'est pas satisfaisant avec le diamètre des bouteilles utilisées. La puissance de l'appoint d'Arpège est trop élevée en rapport de la puissance possible de stockage des modules de PCM.

Notre projet s'est terminé par une analyse de cycle de vie réalisée sur l'utilisation de PCM (paraffine) dans une installation solaire. Il en ressort que les impacts environnementaux engendrés par l'ajout de ces matériaux à changement de phase sont faibles par rapport à ceux provoqués par la consommation énergétique liée à la demande en chauffage ou en eau chaude sanitaire. L'ajout des PCM dans la cuve, n'augmente que de 0.5 à 2% l'énergie grise (NRE) et de 1 à 4% les émissions de gaz à effet de serre (GWP). Ainsi, si l'on trouve une solution avec des matériaux à changement de phase qui permettent de réduire l'énergie d'appoint de quelques pourcents, les impacts totaux avec des PCM seront plus bas que sans PCM.

De son côté, le groupe de l'Université de Graz a montré par simulation qu'il devrait y avoir un intérêt à employer les PCM dans un stock tampon afin de réduire le nombre d'enclenchements d'un brûleur. De notre côté, nous avons remarqué expérimentalement et par simulations que l'utilisation de PCM pouvait augmenter ce nombre d'enclenchements et de déclenchements de l'appoint. Ces deux résultats antagonistes montrent l'importance de la relation entre la rapidité de stockage thermique et l'échange de chaleur entre l'eau de la cuve et le matériau à changement de phase. Il nous semble donc important de pouvoir caractériser le rapport qui existe entre la puissance à stocker et le transfert de chaleur eau-PCM. La diminution de ce rapport permettrait de profiter des avantages des matériaux à changement de phase. Afin d'effectuer cette analyse de sensibilité, nous proposons d'entreprendre une série d'expériences sur la base d'un chauffe-eau avec un appoint électrique. Cela présentera l'avantage d'avoir une plage de température d'utilisation plus réduite et une puissance modulable.

Ces résultats complémentaires ainsi que des simulations devraient permettre de trouver une relation entre la puissance à stocker et les propriétés du PCM. Il sera alors plus facile d'identifier les applications pour lesquelles les PCM ont un potentiel d'utilisation et éventuellement de définir une installation "idéale".

## 14 Collaborations

Une collaboration avec l'Université de Leida en Espagne (Dr. Lluisa F. Cabeza, Department of Informatics and Industrial Engineering) s'est concrétisée par un échange d'une semaine pour chaque représentant des deux écoles concernées.

1) Jacques Bony s'est rendu à Leida. Il a profité de cette visite pour améliorer ses connaissances dans les PCM, ainsi que dans les méthodes d'évaluation des caractéristiques de ces matériaux (méthodes T-history et DSC).

2) Lluisa F. Cabeza et Manuel Ibanez sont venus du 7 au 12 février 2005 à Yverdon. Pendant cette visite, nos visiteurs ont fait connaissance de notre banc de tests Arpège.

Nous avons profité de cette venue pour recevoir également Andreas Heinz et Peter Puschnig de l'Université de Graz (Autriche) du 10 au 12 février 2005 pour rencontre spécifiquement dédiée à la modélisation des PCM. Cette collaboration constructive et fructueuse a débouché sur un article [7].

## 15 Publications et conférences

Handbook : un texte synthétisant l'historique de l'application des PCMs dans le stockage thermique appliqué au solaire a été terminé et intégré dans le document intitulé : *Thermal Energy storage for solar and low energy buildings* [1].

Dans le cadre de la conférence PCM'05 qui s'est déroulée à Yverdon du 15 au 17 juin 2005, J. Bony a présenté un article étant le fruit d'une collaboration avec les universités de Lleida (Espagne) et de Graz (Autriche) qui en sont également co-auteurs.

Durant l'année 2006, nous avons présenté un article lors de la conférence internationale ECOS-TOCK06 qui s'est tenue à Stockton aux Etats-Unis [20]. Cet article faisait référence au modèle numérique intégrant le coefficient de conduction effectif présenté dans ce rapport.

Un article a été soumis à la revue "Energy & Buildings" en 2006. L'article a été accepté et sera publié ultérieurement. Par la même occasion, M. J. Bony a été inclus dans la liste des reviewers dans le domaine des PCM.

Dans le cadre de la conférence BS2007, qui aura lieu en septembre 2007 en Chine, nous avons soumis un article sur la modélisation des PCM et leur utilisation dans Arpège. Cet article comprend les derniers résultats obtenus sur les bilans énergétiques de l'installation.

## **16 Remerciements**

Nous tenons à remercier particulièrement :

L'Office Fédéral de l'Energie pour le financement de ce projet.

M. Jean-Christophe Hadorn en tant qu'instigateur de la Tâche 32 de l'AIE et pour le soutien qu'il nous a apporté.

Les participants à la Tâche 32, pour leurs collaborations et échanges fructueux.

L'entreprise SGL Carbon pour la fourniture de l'acétate de sodium avec du graphite qui nous a permis de réaliser nos mesures.

## 17 Références

- [1] Jean-Christophe Hadorn, Thermal energy storage for solar and low energy buildings, 2005.
- [2] Davide Ruggeri, Analyse de l'évolution temporelle et spatiale des matériaux à changement de phase, travail de diplôme 2005.
- [3] A. Abhat, Low temperature latent heat thermal energy storage: heat storage materials, *Solar Energy*, 30, p313–332, 1983.
- [4] Belén Zalba, José Ma Marin, Luisa F. Cabeza, Harald Mehling, Review on thermal energy storage with phase change: materials, heat transfer analysis and applications, *Applied Thermal Engineering* 23, p251-283, 2003
- [5] Mohammed M. Farid, Amar M. Khudhair, Siddique Ali K. Razack, Said Al-Hallaj, A review on phase change energy storage: materials and applications, *Energy Conversion and Management*, 2003.
- [6] TRNSYS reference manual
- [7] J.Bony et al., Three different approaches to simulate PCM bulk elements in solar storage tank, PCM2005, Yverdon-les-Bains, juin 2005.
- [8] Franck P. Incropera, David P. De Witt, *Fundamentals of heat and mass transfer*, 1990.
- [9] E. Achenbach, Heat and flow characteristics of packed beds, *Experimental Thermal and Fluid Science*, 10:p 17-27, 1995.
- [10] Yunus A. Cengel, *Heat Transfer: A Practical Approach*, 1997, International Edition.
- [11] Documentation Rubitherm, Allemagne (paraffine)
- [12] Documentation SGL Carbon Group, Allemagne (acetate de sodium avec graphite)
- [13] Georg Oberndorfer and al., Sensitivity of annual solar fraction of solar space and water heating systems to tank and collector heat exchanger model parameters.
- [14] Huib Visser, Energy storage in phase-change materials – Development of a component model compatible with the TRNSYS transient simulation program, Delft University of Technology, 1986.
- [15] Peter Egolf, Project Latentwärmespeicher für die Sonnenenergienutzung: Lade- und Entladevorgänge, 1997.
- [16] Werner Weiss and al., *Design handbook for solar combisystems*, James & James, London, 2003.
- [17] METEONORM
- [18] S. Citherlet, J. Bony, *Rapport annuel CoSyPCM*, OFEN, 2005
- [19] Citherlet S. and Defaux T., Energy and environmental comparison of three variants of a family house during its whole life span, *Building and Environment*, vol., pp. 591-598, 2006.
- [20] J. Bony, S. Citherlet, Extension of a TRNSYS model for latent heat storage with phase change materials used in solar water tank, *Ecostock06*, 2006.

## 18 ANNEXES

(A1) *Caractéristiques des différents matériaux à changement de phase utilisés :*

| Propriétés                    | Paraffine RT27 et RT54 [11]   | Acétate de sodium + graphite  |
|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|
| Conduction [W/m.K]            | 0.2 (solide et liquide)       | 4 (solide et liquide)         |
| Densité [kg/l]                | 0.9 (solide) – 0.75 (liquide) | 1.3 à 1.4 (solide et liquide) |
| Cp [kJ/kg]                    | 1.8 (solide) – 2.4 (liquide)  | 2 (solide et liquide)         |
| Chaleur latente [kJ/kg]       | 180                           | 150                           |
| [kJ/l]                        | 150                           | 240                           |
| Température de transformation | 27 (RT27) et 54 (RT54)        | 58                            |

Valeurs enthalpiques en fonction de la température des différents matériaux utilisés. Pour les paraffines, les mesures proviennent de l'université de Lleida alors que pour l'acétate de sodium (SA+G), elles proviennent de l'université de Graz.

| RT27             |                   |
|------------------|-------------------|
| Température [°C] | Enthalpie [kJ/kg] |
| 0                | 0                 |
| 17               | 34                |
| 24               | 89                |
| 27               | 154               |
| 30               | 244               |
| 100              | 417               |

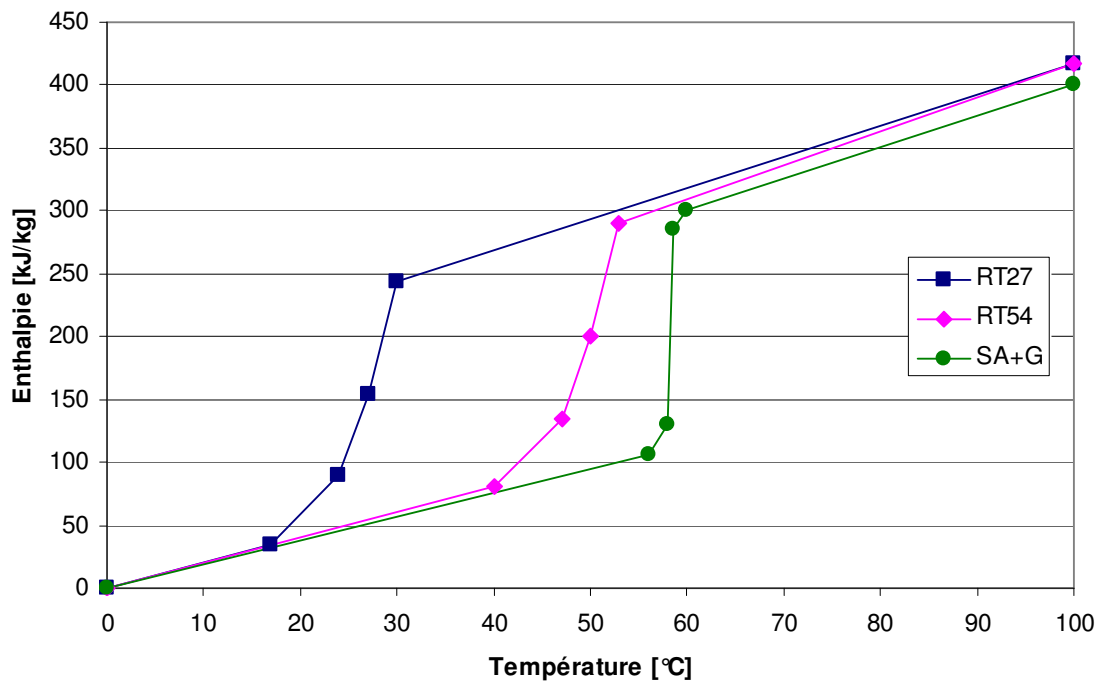
Paraffine RT27

| RT54             |                   |
|------------------|-------------------|
| Température [°C] | Enthalpie [kJ/kg] |
| 0                | 0                 |
| 40               | 80                |
| 47               | 135               |
| 50               | 200               |
| 53               | 290               |
| 100              | 417               |

Paraffine RT54

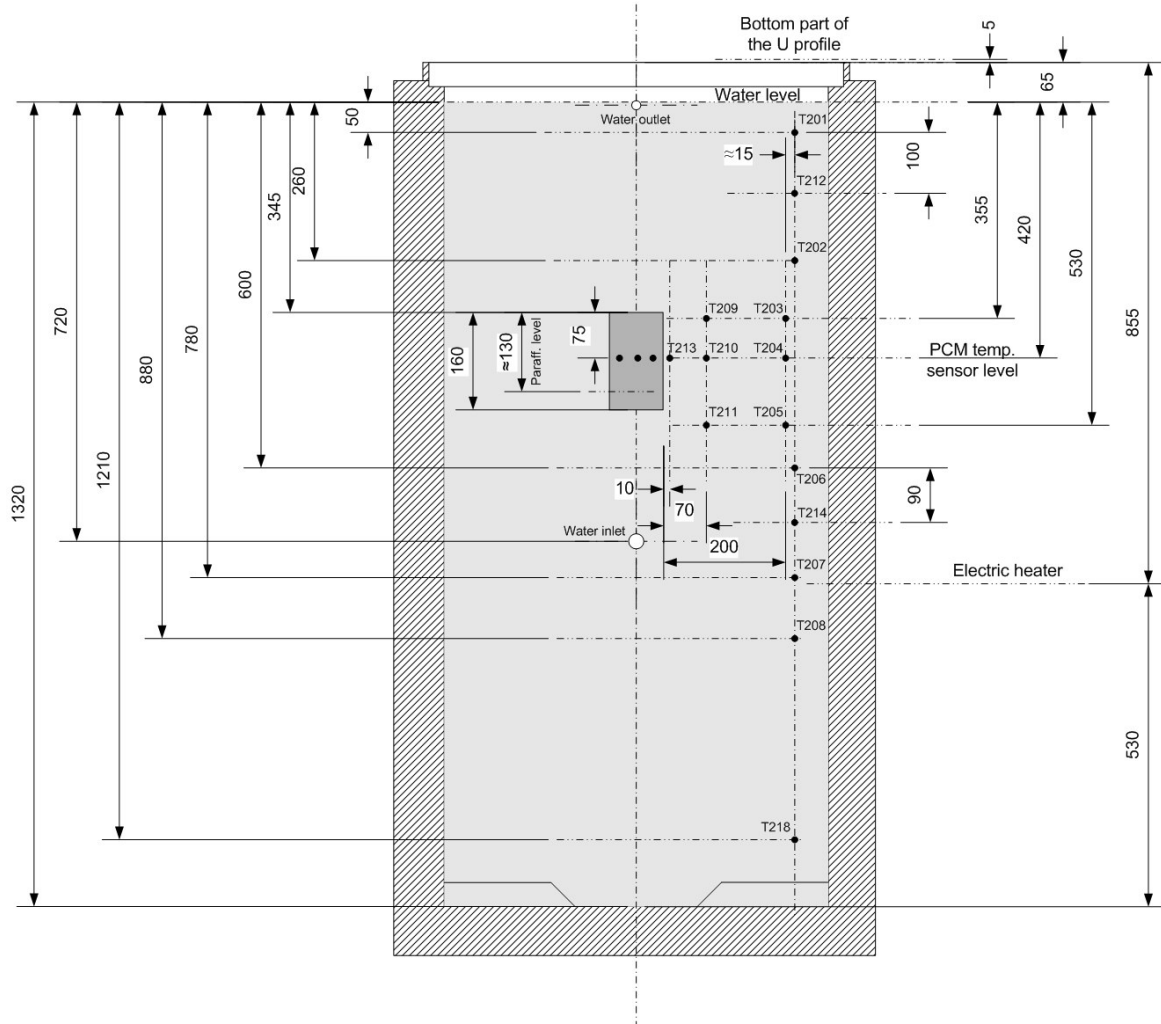
| SA+G             |                   |
|------------------|-------------------|
| Température [°C] | Enthalpie [kJ/kg] |
| 0                | 0                 |
| 56               | 106               |
| 58               | 130               |
| 58.5             | 285               |
| 60               | 301               |
| 100              | 400               |

Acétate de sodium avec du graphite



Représentations graphiques des tableaux ci-dessus concernant l'enthalpie en fonction de la température.

(A2) *Disposition générale lors des mesures de températures dans le module de PCM (chapitres 4 et 5):*



Contenance totale de la cuve : 500 litres.

**(A3) Tableaux des mesures de l'évolution dynamique des températures dans un module de PCM (chapitre 5) - Charge thermique avec de la paraffine RT54 (Figure 33 et Figure 37) :**

| Heure | Teau [°C] | Tsuf [°C] | T prof 15mm [°C] | T prof. 30mm [°C] | Tcentre [°C] | Tentrée [°C] | Débit [l/h] |
|-------|-----------|-----------|------------------|-------------------|--------------|--------------|-------------|
| 0.0   | 35.5      | 22.3      | 22.5             | 22.5              | 22.6         | 21.7         | 258         |
| 0.1   | 36.2      | 35.2      | 23.7             | 22.5              | 22.6         | 69.6         | 248         |
| 0.2   | 39.1      | 38.0      | 25.7             | 22.9              | 23.0         | 68.9         | 238         |
| 0.3   | 41.5      | 40.4      | 27.1             | 23.7              | 23.8         | 68.0         | 251         |
| 0.4   | 43.4      | 42.5      | 28.4             | 24.6              | 24.6         | 67.2         | 244         |
| 0.5   | 45.1      | 44.3      | 29.7             | 25.6              | 25.5         | 67.1         | 232         |
| 0.6   | 46.9      | 46.0      | 31.0             | 26.4              | 26.3         | 68.7         | 231         |
| 0.7   | 48.5      | 47.8      | 32.3             | 27.3              | 27.2         | 69.1         | 240         |
| 0.8   | 50.0      | 49.1      | 33.6             | 28.1              | 27.9         | 68.9         | 199         |
| 0.9   | 51.4      | 50.4      | 35.0             | 28.8              | 28.7         | 68.6         | 229         |
| 1.0   | 52.6      | 51.5      | 36.1             | 29.6              | 29.4         | 68.1         | 251         |
| 1.1   | 53.7      | 52.6      | 37.6             | 30.4              | 30.2         | 68.9         | 235         |
| 1.2   | 54.7      | 53.6      | 38.8             | 31.1              | 30.9         | 67.7         | 240         |
| 1.3   | 55.6      | 54.5      | 40.0             | 31.9              | 31.6         | 67.7         | 216         |
| 1.4   | 56.4      | 55.3      | 41.1             | 32.8              | 32.5         | 67.6         | 229         |
| 1.5   | 57.2      | 56.3      | 42.0             | 33.6              | 33.2         | 69.6         | 245         |
| 1.6   | 58.0      | 57.1      | 43.0             | 34.6              | 34.2         | 68.9         | 203         |
| 1.7   | 58.7      | 57.8      | 43.8             | 35.5              | 35.0         | 69.1         | 224         |
| 1.8   | 59.5      | 58.5      | 44.5             | 36.5              | 36.0         | 68.7         | 215         |
| 1.9   | 60.0      | 59.1      | 45.2             | 37.6              | 37.1         | 67.5         | 212         |
| 2.0   | 60.4      | 59.6      | 45.9             | 38.8              | 38.3         | 66.0         | 227         |
| 2.1   | 60.7      | 59.8      | 46.5             | 40.1              | 39.6         | 66.8         | 224         |
| 2.2   | 61.1      | 60.4      | 47.0             | 41.4              | 40.9         | 67.3         | 241         |
| 2.3   | 61.5      | 60.8      | 47.5             | 42.5              | 42.1         | 68.3         | 211         |
| 2.4   | 62.0      | 61.2      | 47.9             | 43.5              | 43.2         | 69.0         | 253         |
| 2.5   | 62.4      | 61.7      | 48.4             | 44.3              | 44.1         | 68.9         | 237         |
| 2.6   | 62.8      | 62.1      | 48.8             | 44.9              | 44.7         | 68.4         | 240         |
| 2.7   | 63.1      | 62.4      | 49.3             | 45.6              | 45.4         | 67.9         | 233         |
| 2.8   | 63.3      | 62.6      | 50.0             | 46.0              | 45.9         | 67.6         | 244         |
| 2.9   | 63.5      | 62.7      | 51.4             | 46.5              | 46.3         | 66.2         | 235         |
| 3.0   | 63.5      | 62.8      | 54.8             | 46.9              | 46.7         | 66.1         | 217         |
| 3.1   | 63.6      | 63.0      | 58.8             | 47.3              | 47.1         | 66.7         | 216         |
| 3.2   | 63.8      | 63.1      | 60.7             | 47.6              | 47.5         | 67.7         | 226         |
| 3.3   | 64.0      | 63.4      | 61.1             | 48.0              | 47.9         | 67.9         | 228         |
| 3.4   | 64.2      | 63.8      | 61.6             | 48.5              | 48.4         | 68.3         | 221         |
| 3.5   | 64.5      | 64.0      | 62.1             | 49.3              | 49.0         | 68.9         | 241         |
| 3.6   | 64.7      | 64.2      | 62.5             | 50.9              | 50.3         | 67.7         | 239         |
| 3.7   | 64.9      | 64.5      | 63.3             | 63.1              | 61.1         | 68.5         | 232         |
| 3.8   | 65.1      | 64.8      | 64.2             | 64.1              | 64.1         | 66.9         | 223         |
| 3.9   | 65.1      | 64.9      | 64.6             | 64.5              | 64.5         | 66.4         | 231         |
| 4.0   | 65.1      | 65.0      | 64.8             | 64.7              | 64.7         | 66.6         | 229         |
| 4.1   | 65.1      | 65.1      | 64.9             | 64.9              | 64.8         | 66.5         | 217         |
| 4.2   | 65.1      | 65.1      | 65.0             | 65.0              | 64.9         | 66.8         | 233         |
| 4.3   | 65.2      | 65.2      | 65.0             | 65.0              | 64.9         | 67.6         | 233         |
| 4.4   | 65.3      | 65.2      | 65.1             | 65.1              | 65.0         | 68.8         | 227         |
| 4.5   | 65.5      | 65.4      | 65.2             | 65.2              | 65.1         | 68.8         | 232         |
| 4.6   | 65.7      | 65.6      | 65.3             | 65.3              | 65.3         | 68.6         | 240         |
| 4.7   | 65.9      | 65.8      | 65.5             | 65.5              | 65.4         | 68.4         | 224         |

(A4) *Tableaux des mesures de l'évolution dynamique des températures dans un module de PCM (chapitre 5) - Charge thermique avec de l'acétate de sodium additionné de graphite (Figure 35) :*

| Heure | Teau [°C] | Tsuf [°C] | T prof 15mm [°C] | T prof. 30mm [°C] | Tcentre [°C] | Tentrée [°C] | Débit [l/h] |
|-------|-----------|-----------|------------------|-------------------|--------------|--------------|-------------|
| 0.00  | 71.5      | 22.7      | 22.3             | 22.4              | 22.5         | 0.0          | 0           |
| 0.05  | 71.2      | 60.1      | 53.7             | 46.3              | 37.8         | 0.0          | 0           |
| 0.10  | 71.2      | 62.0      | 57.7             | 55.2              | 53.5         | 0.0          | 0           |
| 0.15  | 71.1      | 63.4      | 58.2             | 56.9              | 56.4         | 0.0          | 0           |
| 0.20  | 71.1      | 64.4      | 58.9             | 57.5              | 57.2         | 0.0          | 0           |
| 0.25  | 71.1      | 65.2      | 60.1             | 58.0              | 57.5         | 0.0          | 0           |
| 0.30  | 71.0      | 65.7      | 61.2             | 58.0              | 57.8         | 0.0          | 0           |
| 0.35  | 70.9      | 66.2      | 62.2             | 58.0              | 58.0         | 0.0          | 0           |
| 0.40  | 70.8      | 66.6      | 63.2             | 58.0              | 58.0         | 0.0          | 0           |
| 0.45  | 70.9      | 66.9      | 64.0             | 58.0              | 58.0         | 0.0          | 0           |
| 0.50  | 70.8      | 67.3      | 64.7             | 58.1              | 58.0         | 0.0          | 0           |
| 0.55  | 70.8      | 67.6      | 65.3             | 58.2              | 58.0         | 0.0          | 0           |
| 0.60  | 70.7      | 67.9      | 65.7             | 59.0              | 58.0         | 0.0          | 0           |
| 0.65  | 70.7      | 68.1      | 66.1             | 60.3              | 57.9         | 0.0          | 0           |
| 0.70  | 70.7      | 68.3      | 66.6             | 61.6              | 57.9         | 0.0          | 0           |
| 0.75  | 70.6      | 68.5      | 67.0             | 62.8              | 57.9         | 0.0          | 0           |
| 0.80  | 70.6      | 68.8      | 67.5             | 64.0              | 58.0         | 0.0          | 0           |
| 0.85  | 70.6      | 69.1      | 68.1             | 65.3              | 59.5         | 0.0          | 0           |
| 0.90  | 70.5      | 69.3      | 68.6             | 66.6              | 64.4         | 0.0          | 0           |
| 0.95  | 70.4      | 69.5      | 69.1             | 67.8              | 66.5         | 0.0          | 0           |
| 1.00  | 70.4      | 69.7      | 69.5             | 68.6              | 67.7         | 0.0          | 0           |
| 1.05  | 70.3      | 69.9      | 69.8             | 69.1              | 68.6         | 0.0          | 0           |
| 1.10  | 70.3      | 70.0      | 70.0             | 69.5              | 69.2         | 0.0          | 0           |
| 1.15  | 70.3      | 70.1      | 70.2             | 69.8              | 69.5         | 0.0          | 0           |
| 1.20  | 70.3      | 70.1      | 70.3             | 69.9              | 69.8         | 0.0          | 0           |
| 1.25  | 70.3      | 70.1      | 70.3             | 70.0              | 69.9         | 0.0          | 0           |
| 1.30  | 70.3      | 70.1      | 70.4             | 70.1              | 70.0         | 0.0          | 0           |
| 1.35  | 70.3      | 70.1      | 70.4             | 70.1              | 70.0         | 0.0          | 0           |
| 1.40  | 70.2      | 70.1      | 70.4             | 70.1              | 70.0         | 0.0          | 0           |
| 1.45  | 70.2      | 70.1      | 70.4             | 70.1              | 70.0         | 0.0          | 0           |
| 1.50  | 70.2      | 70.1      | 70.3             | 70.1              | 70.0         | 0.0          | 0           |
| 1.55  | 70.2      | 70.1      | 70.3             | 70.1              | 70.0         | 0.0          | 0           |

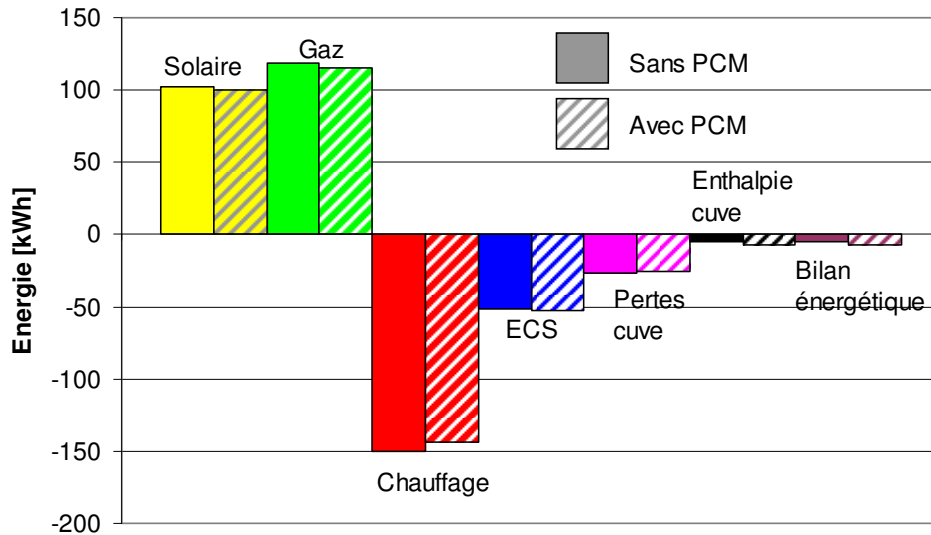
(A5) *Tableaux des mesures de l'évolution dynamique des températures dans un module de PCM (chapitre 5) - Charge thermique avec de la paraffine RT54 additionnée de 2% d'aluminium (nid d'abeilles – Figure 34) :*

| Heure | Teau [°C] | Tsuf [°C] | T prof 15mm [°C] | T prof. 30mm [°C] | Tcentre [°C] | Tentrée [°C] | Débit [l/h] |
|-------|-----------|-----------|------------------|-------------------|--------------|--------------|-------------|
| 0.00  | 61.5      | 22.3      | 22.6             | 23.0              | 22.9         | 0.0          | 0           |
| 0.05  | 61.3      | 57.2      | 26.4             | 23.9              | 23.6         | 0.0          | 0           |
| 0.10  | 61.2      | 57.5      | 30.1             | 26.6              | 26.1         | 0.0          | 0           |
| 0.15  | 61.2      | 58.2      | 32.7             | 28.9              | 28.5         | 0.0          | 0           |
| 0.20  | 61.1      | 58.6      | 35.2             | 30.9              | 30.4         | 0.0          | 0           |
| 0.25  | 61.0      | 58.7      | 37.8             | 32.6              | 32.1         | 0.0          | 0           |
| 0.30  | 61.0      | 58.8      | 40.2             | 34.5              | 33.8         | 0.0          | 0           |
| 0.35  | 60.9      | 58.7      | 42.3             | 37.0              | 36.0         | 0.0          | 0           |
| 0.40  | 60.9      | 59.0      | 44.3             | 40.5              | 39.5         | 0.0          | 0           |
| 0.45  | 60.8      | 59.0      | 45.8             | 43.1              | 42.7         | 0.0          | 0           |
| 0.50  | 60.8      | 59.1      | 46.9             | 44.8              | 44.5         | 0.0          | 0           |
| 0.55  | 60.8      | 59.2      | 47.7             | 45.8              | 45.7         | 0.0          | 0           |
| 0.60  | 60.7      | 59.1      | 48.3             | 46.6              | 46.6         | 0.0          | 0           |
| 0.65  | 60.6      | 59.2      | 48.8             | 47.2              | 47.2         | 0.0          | 0           |
| 0.70  | 60.6      | 59.2      | 49.2             | 47.7              | 47.7         | 0.0          | 0           |
| 0.75  | 60.6      | 59.2      | 49.6             | 48.1              | 48.1         | 0.0          | 0           |
| 0.80  | 60.6      | 59.3      | 49.9             | 48.4              | 48.4         | 0.0          | 0           |
| 0.85  | 60.6      | 59.3      | 50.1             | 48.7              | 48.7         | 0.0          | 0           |
| 0.90  | 60.6      | 59.3      | 50.3             | 48.9              | 49.0         | 0.0          | 0           |
| 0.95  | 60.5      | 59.3      | 50.5             | 49.2              | 49.2         | 0.0          | 0           |
| 1.00  | 60.5      | 59.3      | 50.8             | 49.4              | 49.4         | 0.0          | 0           |
| 1.05  | 60.5      | 59.3      | 51.0             | 49.6              | 49.6         | 0.0          | 0           |
| 1.10  |           |           |                  |                   |              |              |             |
| 1.15  | 60.4      | 59.3      | 51.5             | 50.1              | 50.1         | 0.0          | 0           |
| 1.20  | 60.4      | 59.4      | 51.7             | 50.3              | 50.3         | 0.0          | 0           |
| 1.25  | 60.4      | 59.4      | 51.9             | 50.5              | 50.4         | 0.0          | 0           |
| 1.30  | 60.4      | 59.4      | 52.0             | 50.6              | 50.6         | 0.0          | 0           |
| 1.35  | 60.4      | 59.4      | 52.1             | 50.7              | 50.7         | 0.0          | 0           |
| 1.40  | 60.4      | 59.4      | 52.3             | 50.9              | 50.9         | 0.0          | 0           |
| 1.45  | 60.3      | 59.4      | 52.5             | 51.1              | 51.0         | 0.0          | 0           |
| 1.50  | 60.3      | 59.4      | 52.7             | 51.2              | 51.2         | 0.0          | 0           |
| 1.55  | 60.3      | 59.4      | 52.9             | 51.4              | 51.3         | 0.0          | 0           |
| 1.6   | 60.3      | 59.5      | 53.1             | 51.5              | 51.5         | 0.0          | 0           |
| 1.7   | 60.3      | 59.5      | 53.4             | 51.7              | 51.6         | 0.0          | 0           |
| 1.7   | 60.2      | 59.5      | 53.6             | 51.9              | 51.8         | 0.0          | 0           |
| 1.8   | 60.2      | 59.6      | 54.0             | 52.1              | 52.0         | 0.0          | 0           |
| 1.8   | 60.2      | 59.6      | 54.7             | 52.2              | 52.1         | 0.0          | 0           |
| 1.9   | 60.2      | 59.6      | 55.2             | 52.4              | 52.3         | 0.0          | 0           |
| 1.9   | 60.2      | 59.7      | 55.8             | 52.6              | 52.5         | 0.0          | 0           |
| 2.0   | 60.2      | 59.7      | 56.2             | 52.8              | 52.7         | 0.0          | 0           |
| 2.0   | 60.1      | 59.7      | 56.5             | 53.1              | 53.0         | 0.0          | 0           |
| 2.1   | 60.1      | 59.7      | 56.9             | 53.4              | 53.2         | 0.0          | 0           |
| 2.1   | 60.1      | 59.8      | 57.2             | 53.9              | 53.6         | 0.0          | 0           |
| 2.2   | 60.1      | 59.8      | 57.6             | 56.0              | 55.5         | 0.0          | 0           |
| 2.2   | 60.1      | 59.8      | 58.0             | 56.8              | 56.7         | 0.0          | 0           |
| 2.3   | 60.1      | 59.9      | 58.3             | 57.5              | 57.5         | 0.0          | 0           |
| 2.3   | 60.1      | 59.9      | 58.7             | 58.1              | 58.1         | 0.0          | 0           |
| 2.4   | 60.1      | 59.9      | 58.9             | 58.6              | 58.7         | 0.0          | 0           |
| 2.4   | 60.1      | 60        | 59.2             | 58.9              | 59           | 0            | 0           |
| 2.5   | 60.1      | 60        | 59.4             | 59.1              | 59.3         | 0            | 0           |
| 2.5   | 60.1      | 60        | 59.5             | 59.3              | 59.4         | 0            | 0           |
| 2.59  | 60        | 60        | 59.6             | 59.4              | 59.6         | 0            | 0           |
| 2.65  | 60        | 60        | 59.7             | 59.5              | 59.7         | 0            | 0           |
| 2.71  | 60        | 60        | 59.7             | 59.6              | 59.8         | 0            | 0           |
| 2.77  | 60        | 60        | 59.8             | 59.7              | 59.8         | 0            | 0           |
| 2.83  | 60        | 60        | 59.8             | 59.7              | 59.9         | 0            | 0           |
| 2.89  | 60        | 60        | 59.8             | 59.8              | 59.9         | 0            | 0           |
| 2.95  | 59.9      | 60        | 59.9             | 59.8              | 59.9         | 0            | 0           |
| 3.01  | 59.9      | 60        | 59.9             | 59.8              | 59.9         | 0            | 0           |

(A6) *Tableaux des mesures de l'évolution dynamique des températures dans un module de PCM (chapitre 5) - Charge thermique avec de la paraffine RT54 additionner additionnée de 2% d'aluminium (copeaux –Figure 34) :*

| Heure | Teau [°C] | Tsuf [°C] | T prof 15mm [°C] | T prof. 30mm [°C] | Tcentre [°C] | Tentrée [°C] | Débit [l/h] |
|-------|-----------|-----------|------------------|-------------------|--------------|--------------|-------------|
| 0.00  | 61.2      | 21.4      | 21.2             | 21.3              | 21.3         | 0.0          | 0           |
| 0.05  | 60.9      | 52.7      | 30.6             | 26.7              | 25.8         | 0.0          | 0           |
| 0.10  | 60.9      | 54.7      | 37.2             | 32.6              | 31.4         | 0.0          | 0           |
| 0.15  | 60.9      | 55.8      | 41.9             | 38.3              | 37.0         | 0.0          | 0           |
| 0.20  | 60.8      | 56.5      | 45.3             | 43.1              | 42.5         | 0.0          | 0           |
| 0.25  | 60.8      | 57.1      | 47.3             | 45.6              | 45.2         | 0.0          | 0           |
| 0.30  | 60.8      | 57.4      | 48.7             | 47.2              | 46.9         | 0.0          | 0           |
| 0.35  | 60.8      | 57.7      | 49.6             | 48.2              | 48.1         | 0.0          | 0           |
| 0.40  | 60.7      | 57.9      | 50.4             | 49.0              | 48.8         | 0.0          | 0           |
| 0.45  | 60.8      | 58.2      | 51.0             | 49.6              | 49.4         | 0.0          | 0           |
| 0.50  | 60.7      | 58.3      | 51.5             | 50.1              | 49.9         | 0.0          | 0           |
| 0.55  | 60.7      | 58.5      | 52.0             | 50.5              | 50.4         | 0.0          | 0           |
| 0.60  | 60.6      | 58.8      | 52.5             | 50.9              | 50.8         | 0.0          | 0           |
| 0.65  | 60.7      | 58.9      | 53.0             | 51.4              | 51.2         | 0.0          | 0           |
| 0.70  | 60.6      | 59.1      | 53.4             | 51.8              | 51.6         | 0.0          | 0           |
| 0.75  | 60.6      | 59.3      | 54.1             | 52.3              | 52.0         | 0.0          | 0           |
| 0.80  | 60.6      | 59.5      | 54.8             | 52.9              | 52.5         | 0.0          | 0           |
| 0.85  | 60.5      | 59.7      | 55.6             | 53.9              | 53.3         | 0.0          | 0           |
| 0.90  | 60.5      | 59.8      | 56.4             | 55.1              | 54.7         | 0.0          | 0           |
| 0.95  | 60.5      | 59.9      | 57.3             | 56.3              | 56.1         | 0.0          | 0           |
| 1.00  | 60.4      | 60.0      | 58.0             | 57.2              | 57.1         | 0.0          | 0           |
| 1.05  | 60.4      | 60.1      | 58.5             | 57.9              | 57.9         | 0.0          | 0           |
| 1.10  | 60.4      | 60.1      | 58.9             | 58.3              | 58.4         | 0.0          | 0           |
| 1.15  | 60.3      | 60.1      | 59.2             | 58.7              | 58.8         | 0.0          | 0           |
| 1.20  | 60.3      | 60.1      | 59.4             | 59.0              | 59.1         | 0.0          | 0           |
| 1.25  | 60.3      | 60.1      | 59.5             | 59.3              | 59.3         | 0.0          | 0           |
| 1.30  | 60.2      | 60.1      | 59.7             | 59.5              | 59.6         | 0.0          | 0           |
| 1.35  | 60.2      | 60.1      | 59.7             | 59.6              | 59.7         | 0.0          | 0           |
| 1.40  | 60.2      | 60.1      | 59.9             | 59.7              | 59.9         | 0.0          | 0           |
| 1.45  | 60.2      | 60.1      | 60.0             | 59.8              | 60.0         | 0.0          | 0           |
| 1.50  | 60.1      | 60.1      | 60.0             | 59.8              | 60.0         | 0.0          | 0           |
| 1.55  | 60.1      | 60.1      | 59.9             | 59.8              | 60.0         | 0.0          | 0           |

(A7) *Bilan énergétique sur 7 jours sans PCM et avec PCM avec la météo n°2 (voir le même type de graphique de la Figure 66 avec la météo n°1 page 52) :*



Comme sur le graphique de la Figure 66, il y a une différence de la demande en chauffage liée aux conditions de tests légèrement différentes (température du local d'expérimentation). Il en résulte une différence de la consommation de gaz dans le même rapport. Ce n'est donc pas l'ajout de PCM qui modifie le bilan final.