

# POWER PCM

## Rapport final

|                                  |  |
|----------------------------------|--|
| Auteur et coauteur               | S. Citherlet, J. Bony et J. Morel  |
| Institution mandatée             | Haute Ecole d'Ingénierie et de Gestion du Canton de Vaud<br>(HEIG-VD/LESBAT) |
| Adresse                          | Av. des Sports 14  |
| Téléphone, e-mail, site Internet | Tél.: 024 / 557 63 54<br>stephane.citherlet @heig-vd.ch                      |
| N° projet / n° contrat OFEN      | 100522   |
| Durée prévue du projet (de - à)  | Août 2007 à Avril 2008   |

### RÉSUMÉ

Durant le projet COSY-PCM effectué durant la Tâche 32 de l'Agence internationale de l'énergie (AIE), nous avons analysé le potentiel de stockage d'énergie en utilisant des matériaux à changement de phase (PCM) plongés dans la cuve d'un système solaire combiné (Arpège).

Les résultats obtenus avaient montré que le potentiel d'utilisation des PCM semblait dépendre fortement de la puissance de l'appoint utilisé. Une puissance trop grande ne permet pas aux PCM d'emmagasiner/restituer la chaleur étant donné le mauvais transfert de chaleur dans ce type de matériau, même dans le cas d'un mélange de sodium acétate avec du graphite.

L'objectif de ce projet est de produire des abaques permettant un dimensionnement simple et rapide d'une cuve de stockage d'eau utilisant des matériaux à changements de phase (paraffine et sodium d'acétate avec du graphite), pour différente puissance de soutirage, différent volume de stockage et différents diamètres de module de PCM

Pour atteindre ce but, nous avons :

- Effectué une campagne de mesures dans une nouvelle cuve de stockage
- Développé un modèle numérique de l'installation étudiée en se basant sur le modèle développé précédemment pour modéliser le comportement des PCM
- Validé le modèle avec les résultats expérimentaux
- Effectué une série de simulations pour obtenir les abaques cherchées.

A la suite des différents tests et simulations, nous avons également complété l'étude sur les impacts environnementaux des différents matériaux utilisés, en étudiant le sodium acétate.



## Table des matières

|          |  |           |
|----------|--|-----------|
| <b>1</b> | <b>Introduction .....</b>  | <b>2</b>  |
| <b>2</b> | <b>Experimentation.....</b>  | <b>3</b>  |
| 2.1      | Installations.....   | 3         |
| 2.1.1    | La cuve .....  | 3         |
| 2.1.2    | Les pcm .....  | 5         |
| 2.1.3    | Les bouteilles .....   | 6         |
| 2.1.4    | Acquisition .....  | 8         |
| 2.2      | Equations utilisees pour le bilan d'énergie .....                    | 9         |
| 2.3      | Description des tests .....  | 10        |
| 2.4      | Evolutions des temperatures dans la cuve en phase de test.....       | 13        |
| 2.4.1    | Evolution des temperatures dans la cuve sans pcm .....               | 13        |
| 2.4.2    | Evolution des temperatures dans la cuve sans PCM .....               | 15        |
| 2.4.3    | Evolution des temperatures dans la cuve avec le SAG) .....           | 16        |
| 2.4.4    | Evolution des temperatures dans la cuve avec la paraffine RT27 ..... | 18        |
| 2.5      | Comparaisons mesures – simulations .....                             | 20        |
| <b>3</b> | <b>Règle de dimensionnement .....</b>                                | <b>22</b> |
| 3.1      | Paramètres variables .....   | 22        |
| 3.1.1    | Diamètre et nombre des containers .....                              | 22        |
| 3.1.2    | Pourcentage de PCM et $\Delta T$ utilisable .....                    | 23        |
| 3.1.3    | Courbes enthalpiques utilisées pour les simulations.....             | 24        |
| 3.2      | Critères de validation.....  | 25        |
| <b>4</b> | <b>Abaque de dimensionnement.....</b>                                | <b>27</b> |
| 4.1      | Diminutions des émissions imbrûlées dans une chaudière.....          | 28        |
| <b>5</b> | <b>Impacts environnementaux du SAG .....</b>                         | <b>29</b> |
| 5.1      | Impacts du SAG .....   | 29        |
| 5.1.1    | Système complet : Matériaux et Energie .....                         | 31        |
| <b>6</b> | <b>Conclusion .....</b>  | <b>33</b> |
| <b>7</b> | <b>Remerciements .....</b>   | <b>34</b> |
| <b>8</b> | <b>Références .....</b>  | <b>34</b> |
| <b>9</b> | <b>Annexes .....</b>   | <b>35</b> |
| 9.1      | Comparaisons mesures – simulations .....                             | 35        |

# 1 INTRODUCTION

Durant le projet COSY-PCM effectué durant la Tâche 32 de l'Agence internationale de l'énergie (AIE), nous avons analysé le potentiel de stockage d'énergie en utilisant des matériaux à changement de phase (PCM) plongés dans la cuve d'un système solaire combiné (Arpège)

Les résultats obtenus n'avaient pas montré une amélioration significative des performances lors de l'utilisation de PCM dans la cuve de stockage. Les raisons en étaient la disposition du brûleur intégré dans la cuve, entraînant une charge thermique du PCM par l'appoint gaz et non par le circuit solaire, ainsi qu'un manque de place dans cette même cuve pour installer suffisamment de matériaux à changement de phase. Il en résultait de trop fortes variations de la puissance et de variations de la température dans la cuve, pour utiliser au mieux les PCM. Ces résultats ont été confirmés par d'autres groupes participants à la Task 32, dont l'équipe de l'Université de Graz en Autriche.

De toutes ces études, il ressort que les facteurs déterminants pour employer des matériaux à changement de phase sont :

- la puissance de l'appoint
- le transfert de chaleur entre le fluide (généralement de l'eau)
- le coefficient de conduction thermique dans le PCM
- la taille des modules de PCM

La chaleur latente de transformation, est également à prendre en considération. Toutefois, s'il est facile d'agir sur la forme, la taille ou la conduction thermique (ajout d'une matrice conductrice), le matériau lui-même est plus difficile à modifier.

Il est apparu que le potentiel d'utilisation des PCM semble dépendre fortement de la puissance de l'appoint utilisé. Une puissance trop grande ne permet pas aux PCM d'emmagasinier la chaleur étant donné le mauvais transfert de chaleur dans ce type de matériau, même dans le cas d'un mélange de sodium acétate avec du graphite [1] [2].

L'objectif de ce projet est de déterminer la relation qui existe entre la puissance fournie par un appoint et la capacité de stockage d'un PCM. Nous avons donc effectué une campagne de mesures avec une nouvelle cuve de stockage où nous avons pu mettre une quantité plus importante de PCM et où il a été possible de contrôler précisément la puissance de charge et de décharge thermique.

Un modèle numérique de l'installation étudiée dans ce projet a été créé avec TRNSYS. Le code source modélisant le comportement des modules de PCM est le même que celui développé précédemment dans le cadre de la Tâche AIE32. Les résultats expérimentaux ont permis de valider le modèle numérique. Une série de simulations ont été effectuées avec ce modèle afin de réaliser des abaques pour permettre un dimensionnement simple et rapide d'une cuve de stockage d'eau utilisant des matériaux à changements de phase.

A la suite des différents tests et simulations, nous avons également complété l'étude sur les impacts environnementaux des différents matériaux utilisés, en étudiant plus précisément le sodium acétate.

## 2 EXPERIMENTATION

### 2.1 INSTALLATIONS

#### 2.1.1 LA CUVE

Pour effectuer cette expérience, nous avons commandé une cuve inox à l'entreprise CIPAG (Figure 1). En partie basse de cette cuve, il y a un corps de chauffe électrique de 12 kW pour les charges thermiques. Dans le cadre des expériences conduites durant le projet, nous avons réalisés une campagne de mesures en faisant varier la puissance de charge pour différents paliers de température. La décharge thermique est réalisée par des soutirages d'eau chaude.



FIGURE 1: CUVE INOX EQUIPEE

Le banc de tests (Figure 2) permet d'effectuer des charges et des décharges thermiques personnalisées selon le type de matériau introduit dans la cuve.

Une particularité de cette cuve est qu'elle ne dispose pas de système de fermeture étanche pour la sortie de l'ECS, ce qui permet d'éviter de se retrouver en surpression au sein de la cuve. En effet, les bouteilles en aluminium remplies de PCM ne supportent pas la pression extérieure.

Dans la cuve, la charge se fait à l'aide du corps de chauffe électrique selon les scénarios décrits plus bas dans ce rapport. Ce montage a permis de valider la modèle TRNSYS, ce qui a permis d'effectuer toute une série de simulations pour obtenir les abaques cherchées. D'autres simulations s'ajoutent ensuite pour définir une correspondance entre puissance de transfert thermique, taille de module de PCM et coefficient de conductivité.

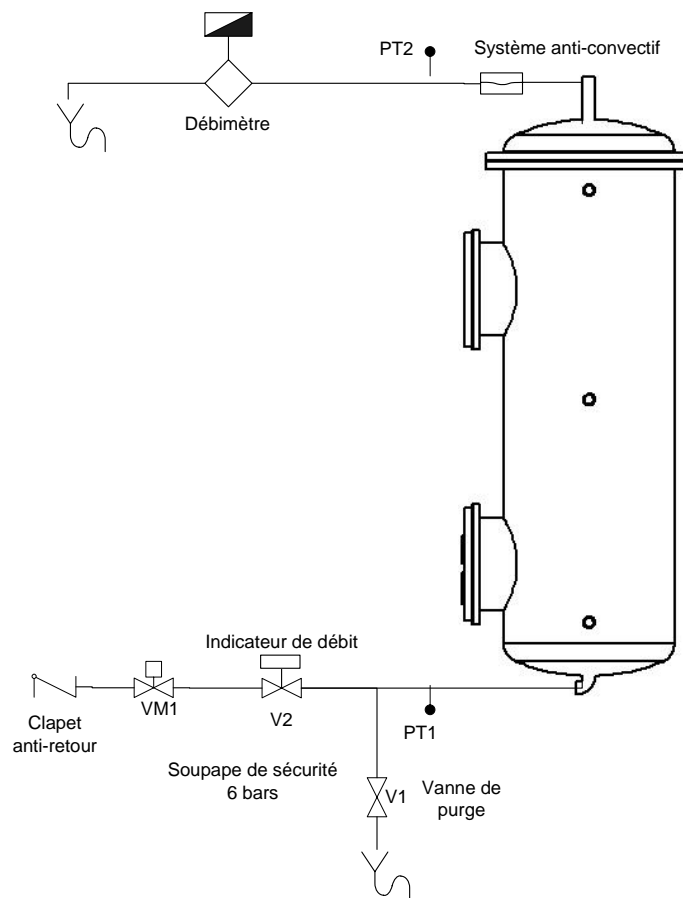


FIGURE 2: SCHEMA D'INSTRUMENTATION DE LA CUVE

#### 2.1.1.1 DISTRIBUTION DES THERMOCOUPLES

Durant les expériences, la température est mesurée dans la cuve à l'aide de 10 thermocouples.

Le bilan d'énergie pour les soutirages d'eau chaude est assuré par deux PT100 et un débitmètre électromagnétique. Les séquences de charge et de décharge ont été réalisées automatiquement par le programme Labview. Les résultats des mesures sont comparés par la suite aux simulations TRNSYS, basées sur le modèle que nous avons développés lors de la phase précédente..

La Figure 3 indique la position des thermocouples par rapport au bas de cuve. Ces positions sont très importantes surtout pour les thermocouples TC01 et TC02. En effet, ces deux sondes se situent à l'endroit où les gradients de température sont les plus importants:

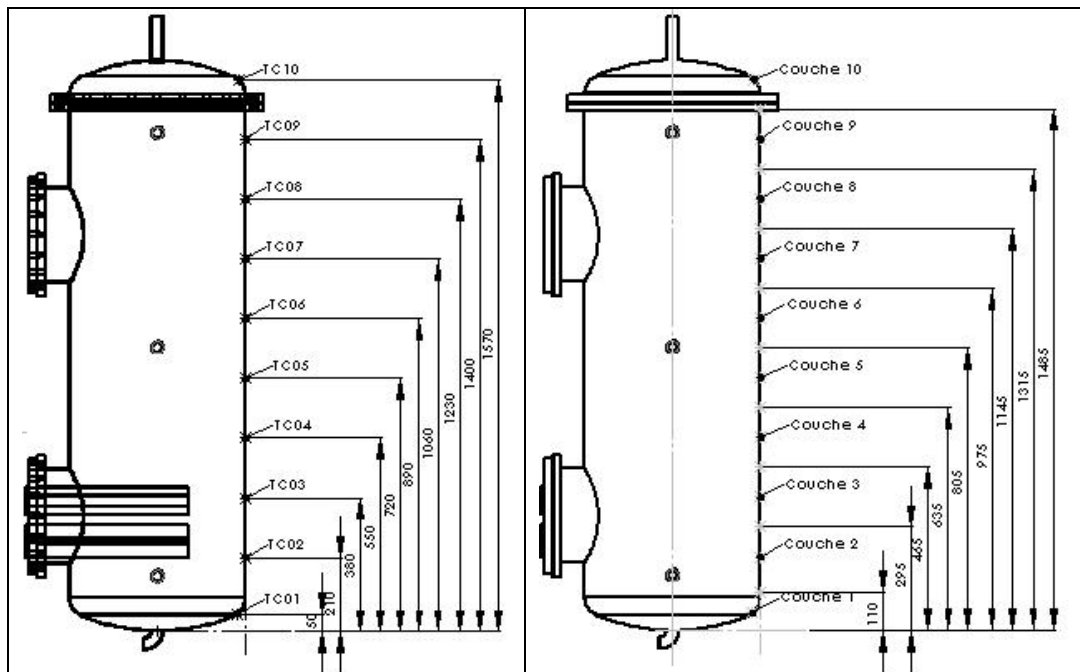


FIGURE 3: DISPOSITION DES THERMOCOUPLES DANS LA CUVE

### 2.1.2 LES PCM

Les tests se sont déroulés avec trois configurations de cuve :

- Sans PCM
- Avec de l'acétate de sodium et du graphite (SAG : Sodium Acetate with Graphite) [10]
- Avec de la paraffine RT27 [11]

Nous avons ainsi à disposition deux types de PCM très différents.

#### 1) SAG

Le SAG qui possède un coefficient de conduction thermique relativement élevé ( $4 \text{ [W/(m.K)]}$ ) grâce à l'ajout de graphite. Ce même graphite bloque la convection dans le PCM à l'état liquide de par sa viscosité très élevée.

La courbe enthalpique de ce matériau est donnée dans la Figure 4 ci-dessous [3]:

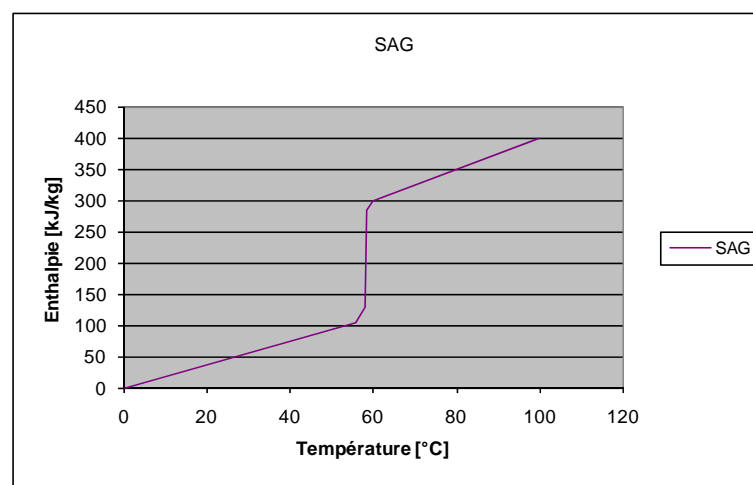


FIGURE 4: COURBE ENTHALPIQUE POUR L'ACETATE DE SODIUM

## 2) Paraffine

La RT27 a un coefficient de conduction thermique faible ( $0.2 \text{ [W/(m.K)]}$ ). D'un autre côté, le phénomène de convection apparaît dans cette paraffine à l'état liquide. Cela augmente sensiblement le transfert de chaleur.

La courbe enthalpique de ce matériau est donnée dans la Figure 5 ci-dessous:

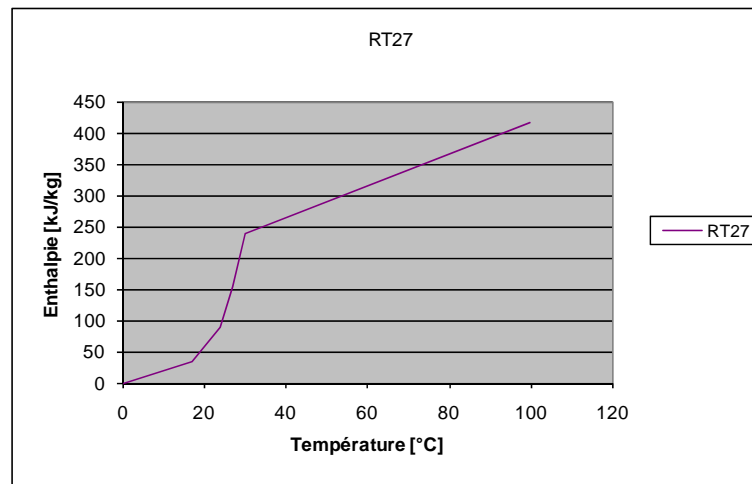


FIGURE 5: COURBE ENTHALPIQUE POUR LA RT27

### 2.1.3 LES BOUTEILLES

Les bouteilles de PCM sont les mêmes que celles utilisées dans la phase précédente du projet:

Volume intérieure: 1.1 litres  
Volume d'eau déplacé: 1.23 litres  
Poids des bouteilles: 102 grammes  
Poids des bouchons: 10 grammes



FIGURE 6: BOUTEILLES DE PCM

Afin de ne pas être en dépression ou surpression trop importante à l'intérieur des bouteilles lors du changement de phase des PCM, nous n'avons pas rempli complètement les bouteilles (90 % de PCM). En laissant ainsi un « bouchon » d'air dans les bouteilles, le PCM peut se dilater ou se contracter sans déformer les récipients.



### 2.1.3.1 EMBLACEMENT DANS LA CUVE

L'emplacement des bouteilles à l'intérieur de la cuve se distribue sur 5 étages.

Pour l'acétate de sodium (SAG), on a la distribution suivante:

- **Etage 1:** 11 bouteilles, 14.460kg
- **Etage 2:** 22 bouteilles, 28.802kg
- **Etage 3:** 23 bouteilles, 30.219kg
- **Etage 4:** 23 bouteilles, 30.626kg
- **Etage 5:** 23 bouteilles, 30.900kg

Pour la RT27, on a la distribution suivante:

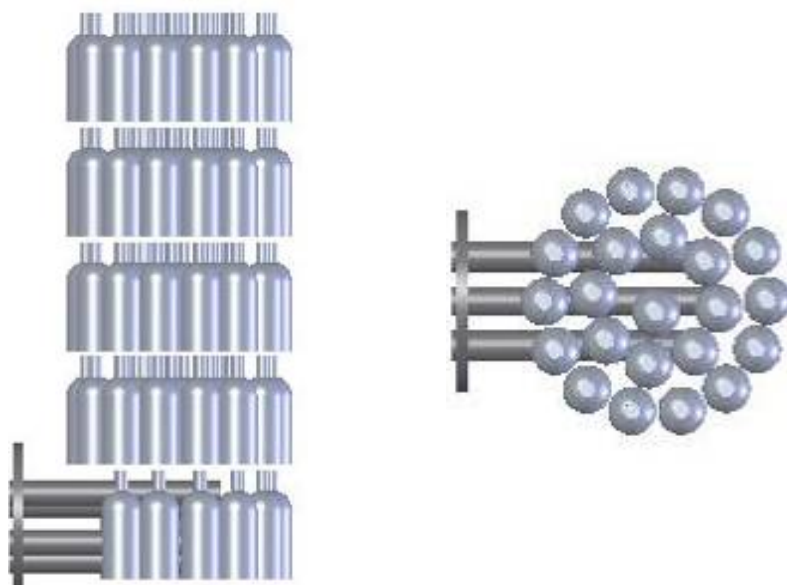
- **Etage 1:** 11 bouteilles, 10.240kg
- **Etage 2:** 22 bouteilles, 20.650kg
- **Etage 3:** 22 bouteilles, 20.768kg
- **Etage 4:** 22 bouteilles, 21.715kg
- **Etage 5:** 11 bouteilles, 10.911kg

La différence de distribution entre le SAG et le RT27 nous avons moins de bouteilles à notre disposition, nous avons donc la répartition suivante:

Les bouteilles ont été placées sur des grillages à partir de la hauteur des corps de chauffe. Pour la RT27, les grillages ont été retenus par des fils de fer attachés aux corps de chauffe car les bouteilles sont plus légères que l'eau.



FIGURE 7: DISPOSITION DES PCM DANS LA CUVE (SAG)



**FIGURE 8: REPARTITION DES BOUTEILLES DANS LA CUVE (SAG)**

Dans le projet précédent, nous avons des pourcentages de PCM relativement faible d'environ 12% maximum en volume. Avec cette nouvelle cuve nous avons pu mettre 34% de PCM en volume. Cela permet de valider notre modèle pour des quantités importantes de matériaux à changement de phase. Pour introduire dans une cuve un pourcentage plus important, il faudrait utiliser un autre type de récipient que les bouteilles. En effet, avec ces dernières, une perte importante de volume est due au bouchon. En utilisant des cylindres de grande longueur il serait possible d'atteindre 45 à 50% de PCM en volume dans une cuve.

#### **2.1.4 ACQUISITION**

Pour l'acquisition des différents paramètres mesurés, nous avons utilisé le programme Labview 7.1. Les appareils d'acquisitions sont des modules FieldPoint qui effectuent l'acquisition en temps réel. Après étalonnage des différentes sondes de température, nous avons procédé à l'acquisition des paramètres par intervalles de 30 secondes. La liste des paramètres acquis est la suivante :

- Température ambiante
- Température d'entrée
- Température de sortie
- Températures niveaux dans la cuve (10 thermocouples)
- Débit d'eau chaude sanitaire
- Tension de consigne pour le régulateur de puissance
- Etat de l'électrovanne (ouvert ou fermé)
- Energie totale soutirée par pas d'acquisition (en Joules)
- Quantité d'eau soutirée par pas d'acquisition (en litres)

L'énergie électrique quant à elle a été mesurée à l'aide d'un analyseur de réseau type MAVOWATT 50. Cet appareil permet d'enregistrer, à intervalles réguliers, l'énergie injectée dans notre cuve et cela en tenant compte de la forme du courant (le régulateur de puissance fait varier le courant et la fréquence ce qui déforme fortement notre courant alternatif du réseau). Le fichier recueilli par cet appareil est ensuite intégré dans le fichier Labview.

## 2.2 EQUATIONS UTILISEES POUR LE BILAN D'ENERGIE

Terminologie :

$Q$  : Energie en [J]

$m$  : masse en [kg]

$C_p$  : chaleur spécifique massique en  $\left[ \frac{\text{J}}{\text{Kg} \cdot \text{K}} \right]$

$\Delta T$  : différence de température en [K]

$\dot{V}$  : débit volumique en  $\left[ \frac{\text{m}^3}{\text{s}} \right]$

$\rho(T)$  : masse volumique de l'eau en  $\left[ \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right]$

$\Delta t$  : temps entre 2 acquisitions en [s]

$h(T)$  : enthalpie du PCM en  $\left[ \frac{\text{J}}{\text{Kg}} \right]$

$\alpha$  : coefficient de pertes thermique de la cuve en  $\left[ \frac{\text{W}}{\text{K}} \right]$

Pour le calcul de l'énergie soutirée à la cuve, nous avons utilisé l'équation suivante:

$$Q = m \cdot c_p \cdot \Delta T = \dot{V} \cdot \rho(T) \cdot c_p \cdot \Delta T \cdot \Delta t \quad [\text{J}]$$

Pour le calcul de l'énergie interne de la cuve, nous avons utilisé l'équation suivante:

$$Q = m_{\text{eau}} \cdot c_{\text{peau}} \cdot T_{\text{eau}} + m_{\text{pcm}} \cdot h(T_{\text{eau}})_{\text{pcm}} \quad [\text{J}]$$

Le terme " $m_{\text{pcm}} \cdot h(T_{\text{eau}})_{\text{pcm}}$ " disparaît lorsque la cuve est utilisée sans PCM.

Pour le calcul des pertes thermiques, nous avons utilisé l'équation suivante :

$$Q_{\text{pertes}} = \alpha \cdot (T_{\text{cuve}_{\text{moy}}} - T_{\text{amb}}) \cdot \Delta t \quad [\text{J}]$$

## 2.3 DESCRIPTION DES TESTS

Plusieurs types de tests ont été nécessaires afin de caractériser notre cuve et effectuer la validation du modèle numérique TRNSYS. Les tableaux 1 à 3 présentent un récapitulatif de ces tests pour respectivement l'eau pure, l'eau avec du SAG et l'eau avec de la paraffine.

| DESCRIPTION DU TEST (Sans PCM)         | PARAMETRES DU TEST  |
|--|---|
| Décroissance de température            | $P_{\text{électrique}} = 0 \text{ [W]}$<br>Décroissance effectuée sur 8 jours<br>Acquisition toutes les 5 minutes   |
| Charge et décharge de la cuve sans PCM | Chauffe: $P_{\text{électrique}} = 1.17 \text{ [kW]}$<br>$T_{\text{paliers}} = 35, 50 \text{ et } 68 \text{ [}^{\circ}\text{C]}$<br>Temps de stabilisation en charge: 60 minutes<br>Soutirage: 5 fois 100 litres<br>Temps de stabilisation en décharge: 15 minutes<br>Débit: ~1000 l/h<br>Acquisition toutes les 30 secondes |
|  | Chauffe: $P_{\text{électrique}} = 3.46 \text{ [kW]}$<br>$T_{\text{paliers}} = 35, 50 \text{ et } 68 \text{ [}^{\circ}\text{C]}$<br>Temps de stabilisation en charge: 60 minutes<br>Soutirage: 5 fois 100 litres<br>Temps de stabilisation en décharge: 15 minutes<br>Débit: ~1000 l/h<br>Acquisition toutes les 30 secondes |
|  | Chauffe: $P_{\text{électrique}} = 4.92 \text{ [kW]}$<br>$T_{\text{paliers}} = 35, 50 \text{ et } 68 \text{ [}^{\circ}\text{C]}$<br>Temps de stabilisation en charge: 60 minutes<br>Soutirage: 5 fois 100 litres<br>Temps de stabilisation en décharge: 15 minutes<br>Débit: ~150 l/h<br>Acquisition toutes les 30 secondes  |
|  | Chauffe: $P_{\text{électrique}} = 9.96 \text{ [kW]}$<br>$T_{\text{paliers}} = 35, 50 \text{ et } 68 \text{ [}^{\circ}\text{C]}$<br>Temps de stabilisation en charge: 60 minutes<br>Soutirage: 5 fois 100 litres<br>Temps de stabilisation en décharge: 15 minutes<br>Débit: ~150 l/h<br>Acquisition toutes les 30 secondes  |

**TABEAU 1: TESTS DE DECROISSANCE DE TEMPÉRATURE ET TESTS SANS PCM**

| DESCRIPTION DU TEST ( <b>Avec SAG</b> ) | PARAMETRES DU TEST   |
|---|--|
| Charge et décharge de la cuve avec SAG  | <p>Chauffe: <math>P_{\text{électrique}} = 1.2 \text{ [kW]}</math></p> <p><math>T_{\text{paliers}} = 35, 50 \text{ et } 68 \text{ [}^{\circ}\text{C]}</math></p> <p>Temps de stabilisation en charge: 180 minutes</p> <p>Soutirage: 5 fois 100 litres</p> <p>Temps de stabilisation en décharge: 180 minutes</p> <p>Débit: ~1000 l/h</p> <p>Acquisition toutes les 30 secondes</p>  |
|   | <p>Chauffe: <math>P_{\text{électrique}} = 3.42 \text{ [kW]}</math></p> <p><math>T_{\text{paliers}} = 35, 50 \text{ et } 68 \text{ [}^{\circ}\text{C]}</math></p> <p>Temps de stabilisation en charge: 180 minutes</p> <p>Soutirage: 5 fois 100 litres</p> <p>Temps de stabilisation en décharge: 180 minutes</p> <p>Débit: ~1000 l/h</p> <p>Acquisition toutes les 30 secondes</p> |
|   | <p>Chauffe: <math>P_{\text{électrique}} = 4.86 \text{ [kW]}</math></p> <p><math>T_{\text{paliers}} = 35, 50 \text{ et } 68 \text{ [}^{\circ}\text{C]}</math></p> <p>Temps de stabilisation en charge: 180 minutes</p> <p>Soutirage: 5 fois 100 litres</p> <p>Temps de stabilisation en décharge: 180 minutes</p> <p>Débit: ~250 l/h</p> <p>Acquisition toutes les 30 secondes</p>  |
|   | <p>Chauffe: <math>P_{\text{électrique}} = 9.8 \text{ [kW]}</math></p> <p><math>T_{\text{paliers}} = 35, 50 \text{ et } 68 \text{ [}^{\circ}\text{C]}</math></p> <p>Temps de stabilisation en charge: 180 minutes</p> <p>Soutirage: 5 fois 100 litres</p> <p>Temps de stabilisation en décharge: 180 minutes</p> <p>Débit: ~250 l/h</p> <p>Acquisition toutes les 30 secondes</p>   |

TABLEAU 2: TESTS AVEC SGA

| DESCRIPTION DU TEST ( <b>Avec RT27</b> ) | PARAMETRES DU TEST  |
|--|---|
| Charge et décharge de la cuve avec RT27  | Chauffe: $P_{\text{électrique}} = 1.18 \text{ [kW]}$<br>$T_{\text{paliers}} = 35 \text{ et } 40 \text{ [}^{\circ}\text{C]}$<br>Temps de stabilisation en charge: 240 minutes<br>Soutirage: 5 fois 100 litres<br>Temps de stabilisation en décharge: 240 minutes<br>Débit: ~1000 l/h<br>Acquisition toutes les 30 secondes |
|  | Chauffe: $P_{\text{électrique}} = 2.44 \text{ [kW]}$<br>$T_{\text{paliers}} = 35 \text{ et } 40 \text{ [}^{\circ}\text{C]}$<br>Temps de stabilisation en charge: 240 minutes<br>Soutirage: 5 fois 100 litres<br>Temps de stabilisation en décharge: 240 minutes<br>Débit: ~1000 l/h<br>Acquisition toutes les 30 secondes |
|  | Chauffe: $P_{\text{électrique}} = 4.88 \text{ [kW]}$<br>$T_{\text{paliers}} = 35 \text{ et } 40 \text{ [}^{\circ}\text{C]}$<br>Temps de stabilisation en charge: 240 minutes<br>Soutirage: 5 fois 100 litres<br>Temps de stabilisation en décharge: 240 minutes<br>Débit: ~250 l/h<br>Acquisition toutes les 30 secondes  |
|  | Chauffe: $P_{\text{électrique}} = 9.9 \text{ [kW]}$<br>$T_{\text{paliers}} = 35 \text{ et } 40 \text{ [}^{\circ}\text{C]}$<br>Temps de stabilisation en charge: 240 minutes<br>Soutirage: 5 fois 100 litres<br>Temps de stabilisation en décharge: 240 minutes<br>Débit: ~250 l/h<br>Acquisition toutes les 30 secondes   |

**TABLEAU 3: TESTS AVEC RT27**

Tous les tests énumérés ci-dessus se sont déroulés quasiment de la même manière. Pour chaque test, quatre puissances de chauffe ont été appliquées (1.2, 3.5, 5 et 10 kW). Pour chaque puissance, trois paliers de température ont été effectués pour les tests sans PCM et avec SGA (35, 50 et 68°C). Pour la dernière série de test avec la paraffine, seul 2 paliers de température ont été nécessaires (35 et 40°C), car cette paraffine présente une température de fusion d'environ 27°C.

Entre chaque phase, de charge ou décharge, on observe un temps de stabilisation, afin que les températures dans la cuve, mais surtout des bouteilles, s'uniformisent. Ce temps de stabilisation varie selon le matériau utilisé.

## 2.4 EVOLUTIONS DES TEMPERATURES DANS LA CUVE EN PHASE DE TEST

### 2.4.1 EVOLUTION DES TEMPERATURES DANS LA CUVE SANS PCM

Nous avons effectué des tests sans PCM afin de nous assurer du bon fonctionnement de l'acquisition et de caractériser la cuve pour paramétrer le modèle TRNSYS.

Les graphiques ci-dessous nous montrent l'évolution des températures dans la cuve sans PCM durant la phase de chauffe (Figure 9 à Figure 12). La sonde TC1 étant en dessous du corps de chauffe électrique, elle reste dans des températures basses. Seule la conduction thermique verticalement dans la cuve chauffe cette partie. La sonde TC2 est juste au bas du corps de chauffe électrique, voir Figure 3. A chaque arrêt de l'appoint, cette température redescend car influencée fortement par la partie froide de la cuve (Figure 9).

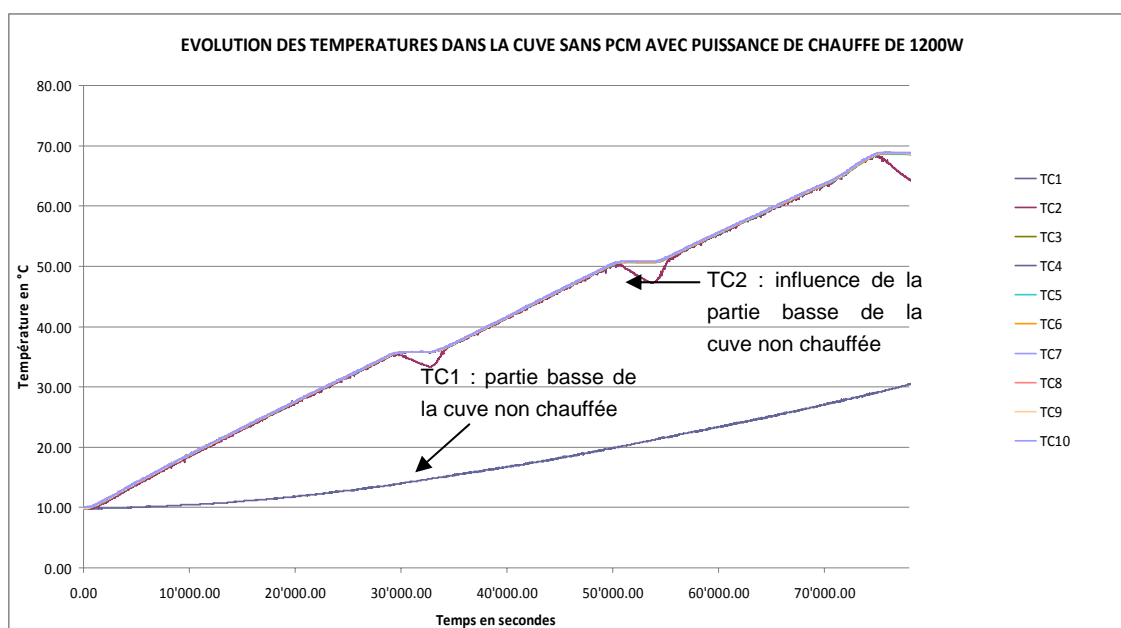


FIGURE 9: EVOLUTION DES TEMPERATURES DANS LA CUVE POUR UNE PUISSANCE DE 1.2KW

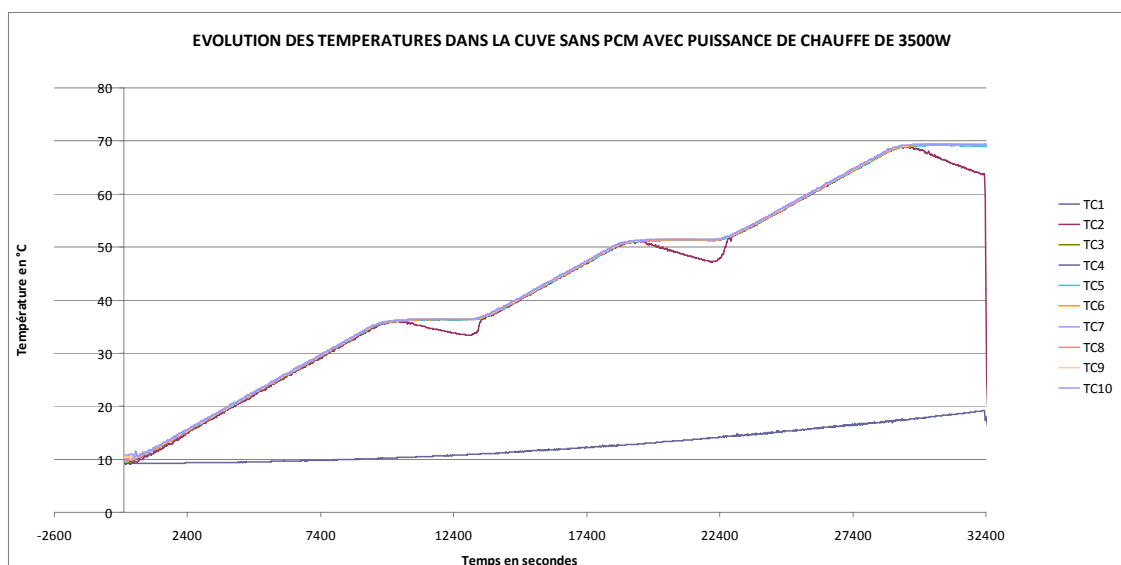


FIGURE 10: EVOLUTION DES TEMPERATURES DANS LA CUVE POUR UNE PUISSANCE DE 3.5KW

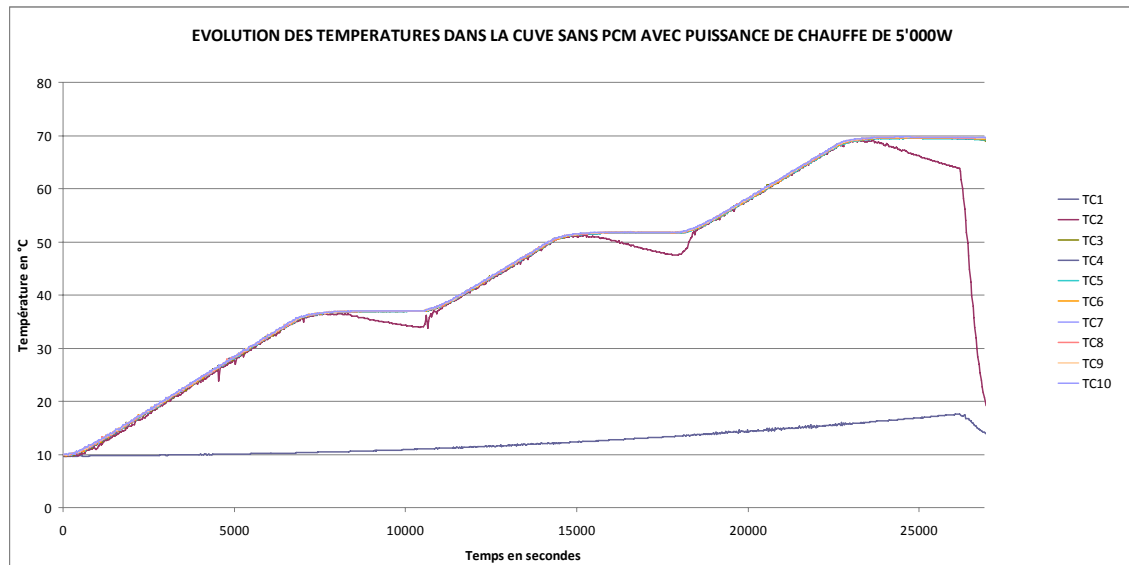


FIGURE 11: EVOLUTION DES TEMPERATURES DANS LA CUVE POUR UNE PUISSANCE DE 5KW

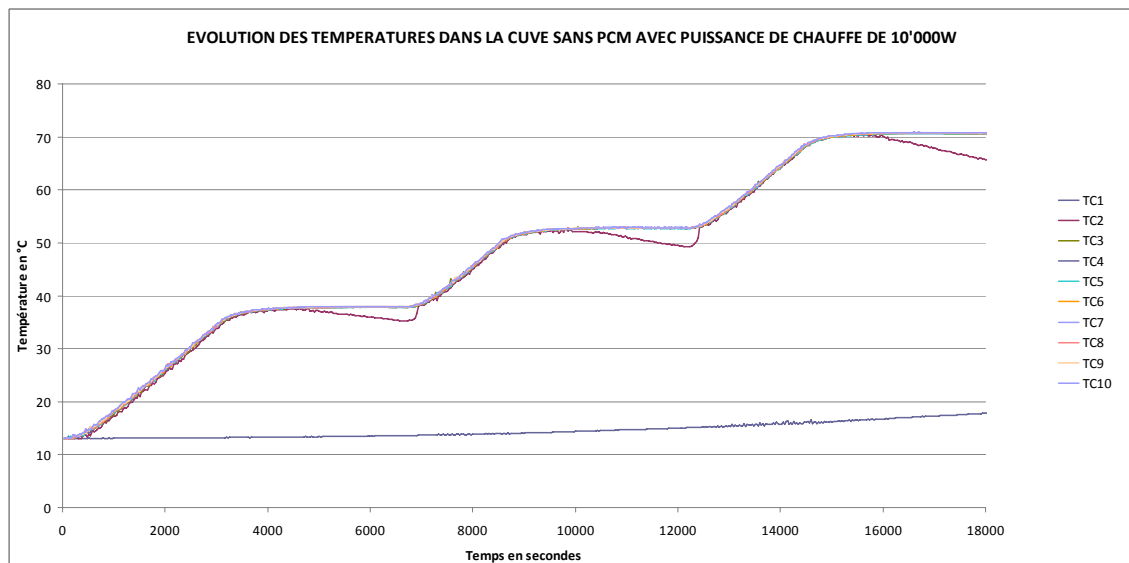


FIGURE 12: EVOLUTION DES TEMPERATURES DASN LA CUVE POUR UNE PUISSANCE DE 10KW



## 2.4.2 EVOLUTION DES TEMPERATURES DANS LA CUVE SANS PCM

Les graphiques ci-dessous nous montrent l'évolution des températures dans la cuve sans PCM durant la phase de décharge :

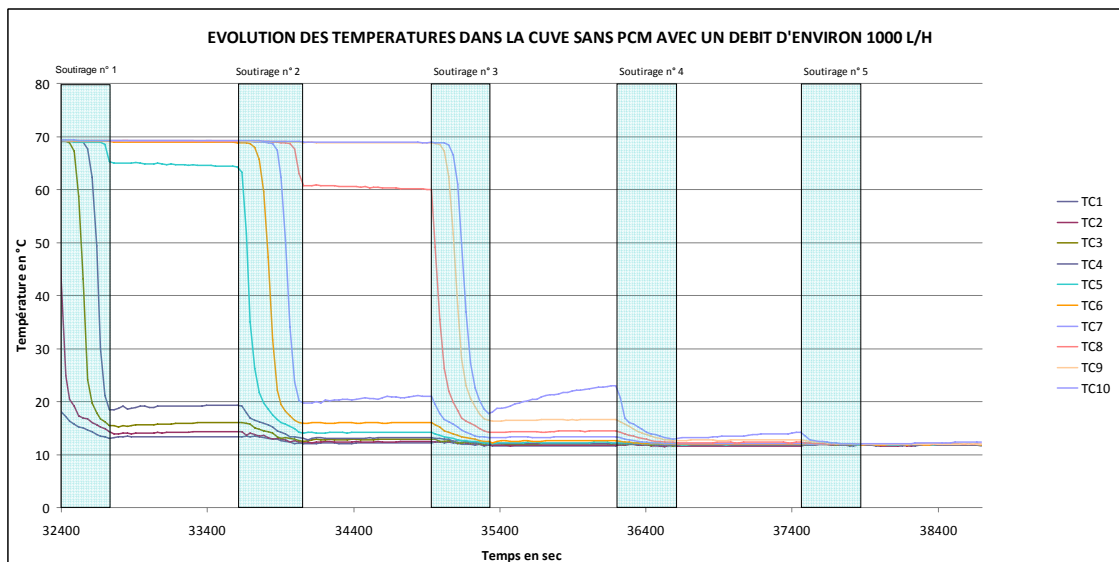


FIGURE 13: SOUTIRAGE DANS CUVE SANS PCM A UN DEBIT DE 1000 L/H

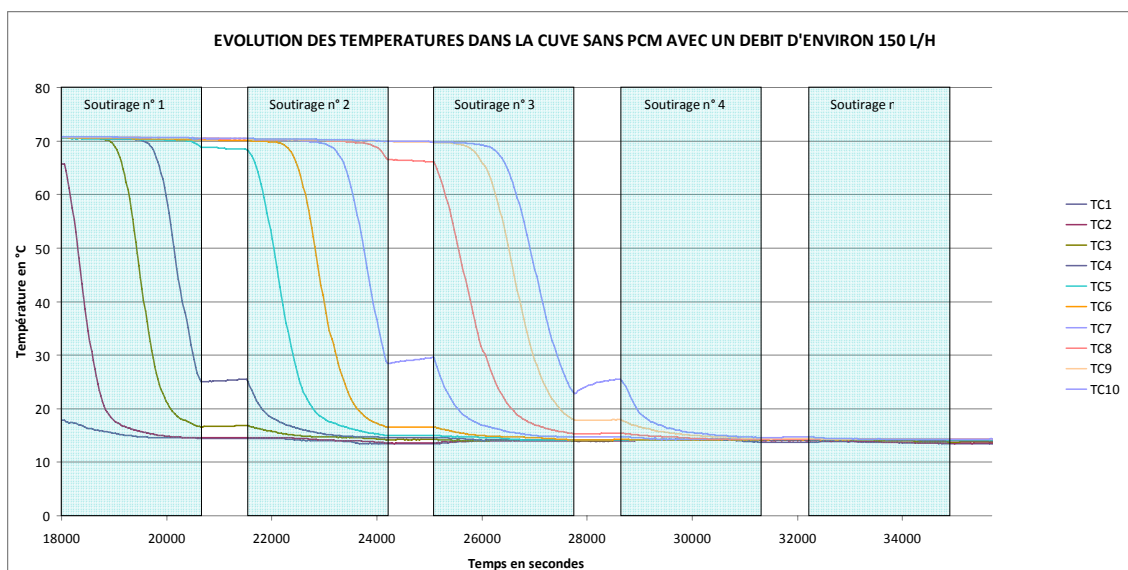


FIGURE 14: SOUTIRAGE DANS CUVE SANS PCM A UN DEBIT DE 150 L/H

A partir du 4<sup>ème</sup> soutirage, la cuve sans PCM est complètement déchargée. La courbe TC10 (bleu) est la dernière à chuter en température. Entre le 3<sup>ème</sup> et le 4<sup>ème</sup> soutirage, elle remonte légèrement due à l'énergie transmise par la flasque du haut de cuve (Figure 2). En effet, à cet endroit, la masse de la cuve est non négligeable et permet de stocker une certaine quantité de chaleur.

### 2.4.3 EVOLUTION DES TEMPERATURES DANS LA CUVE AVEC LE SAG)

Dans la Figure 15 nous pouvons observer un palier de température où le changement de phase de l'acétate de sodium a lieu durant la phase de chauffe.

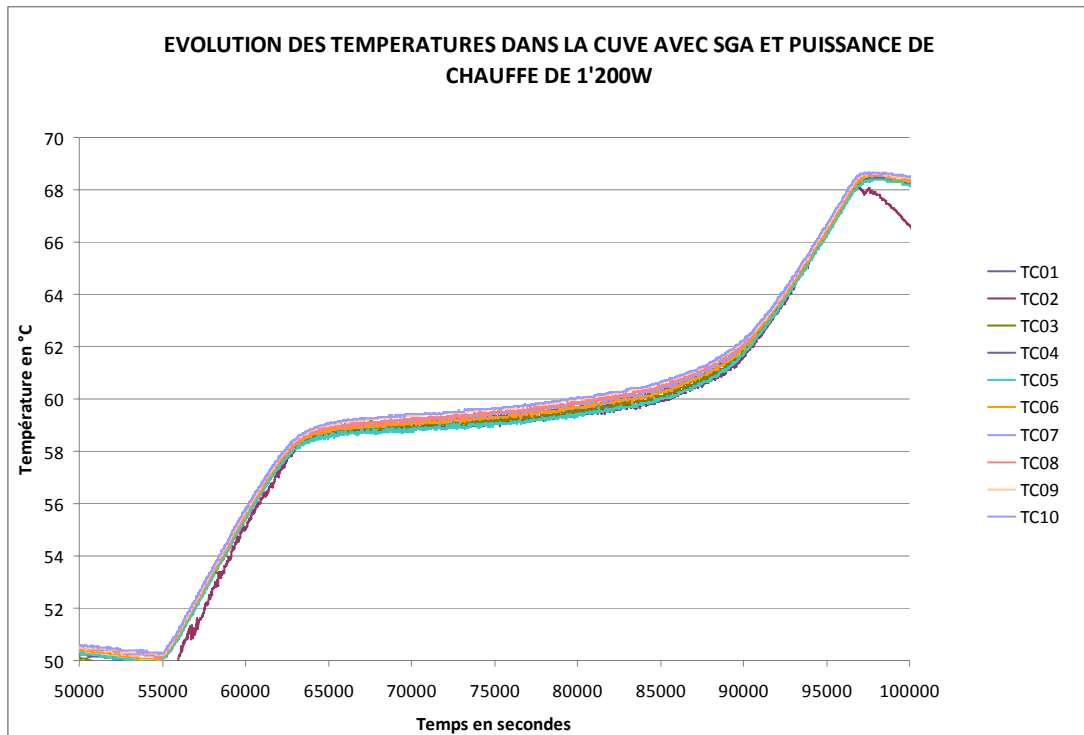


FIGURE 15: EVOLUTION DES TEMPERATURES DANS LA CUVE AVEC SGA POUR UNE PUISSANCE DE 1.2KW

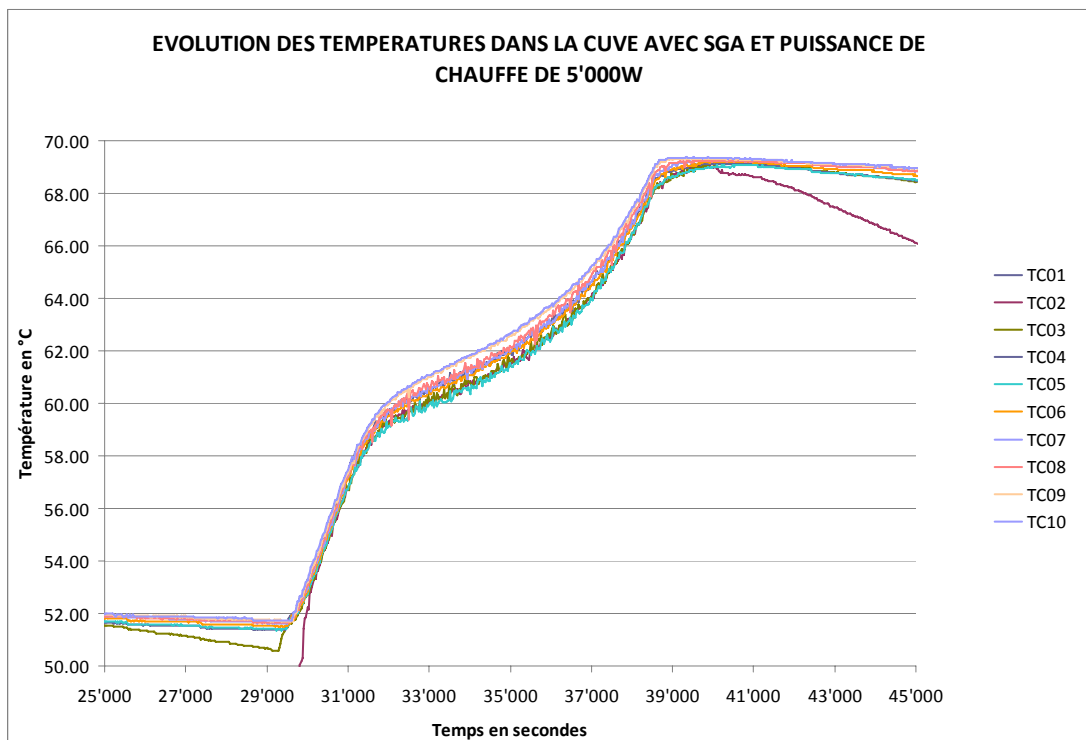


FIGURE 16: EVOLUTION DES TEMPERATURES DANS LA CUVE AVEC SGA ET PUISSANCE DE 5KW

En comparant les Figure 15 et Figure 16, on constate que lorsque la puissance augmente, le temps pour atteindre la température de palier diminue tout en aillant un changement de phase total. Par contre, dans la Figure 17 où la puissance d'appoint est de 10 kW, nous constatons une baisse rapide de la température de l'eau après l'arrêt du corps de chauffe. Cela illustre le manque de transfert de chaleur entre l'eau et le PCM.

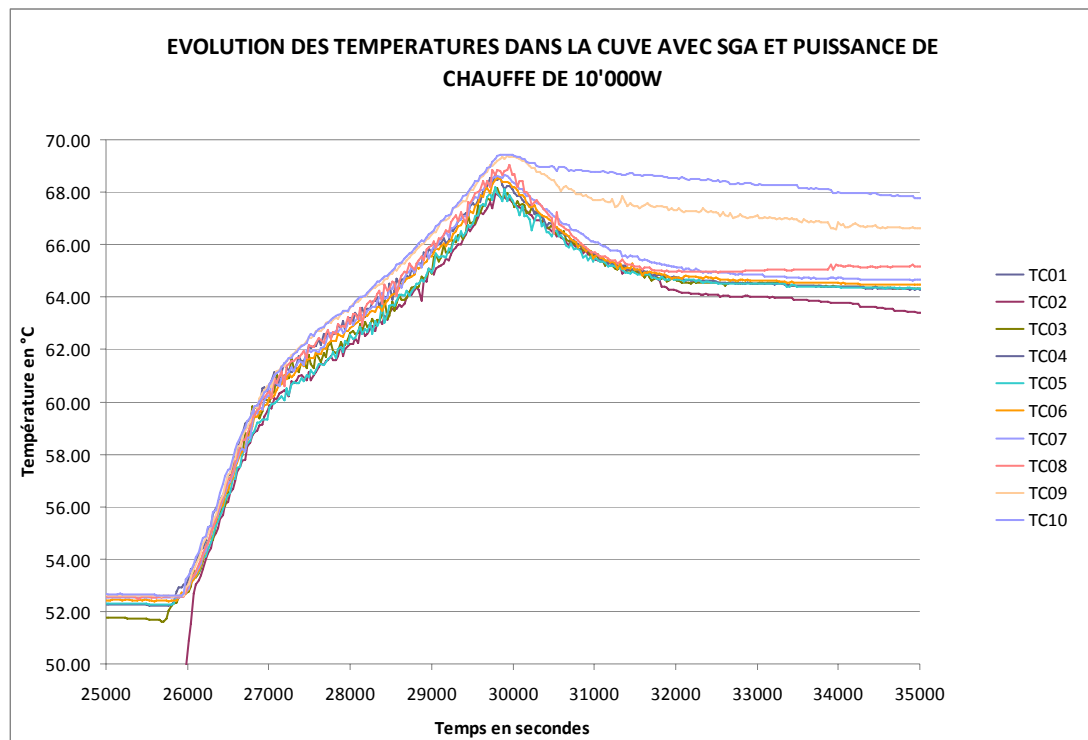


FIGURE 17: EVOLUTION DES TEMPERATURES DANS LA CUVE AVEC SGA ET PUISSANCE DE 10KW

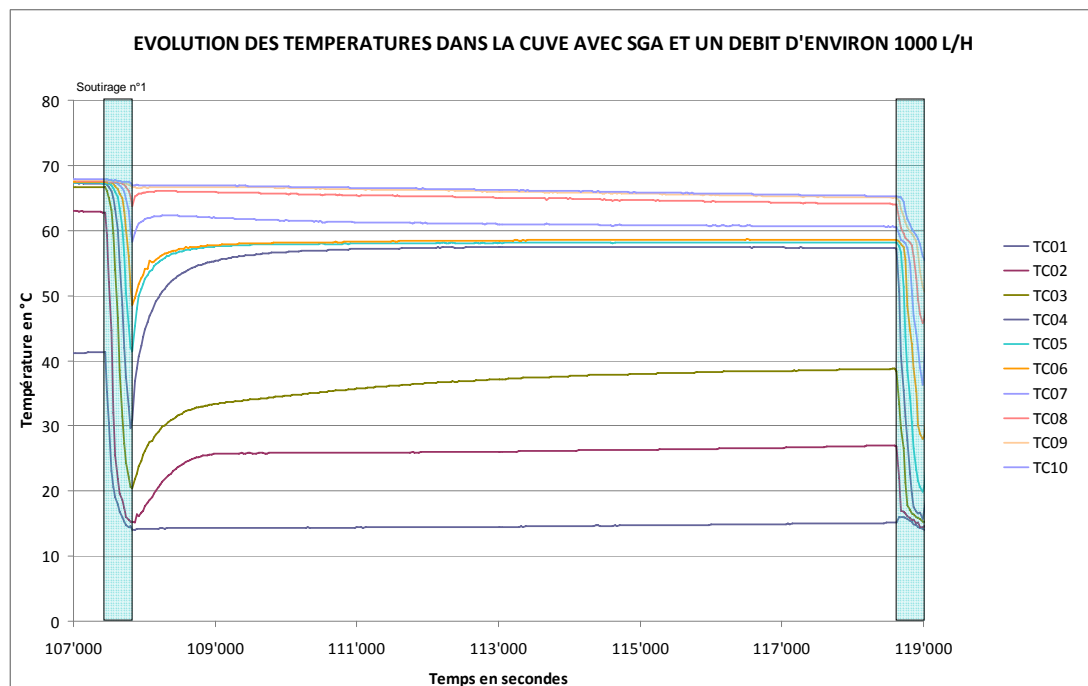
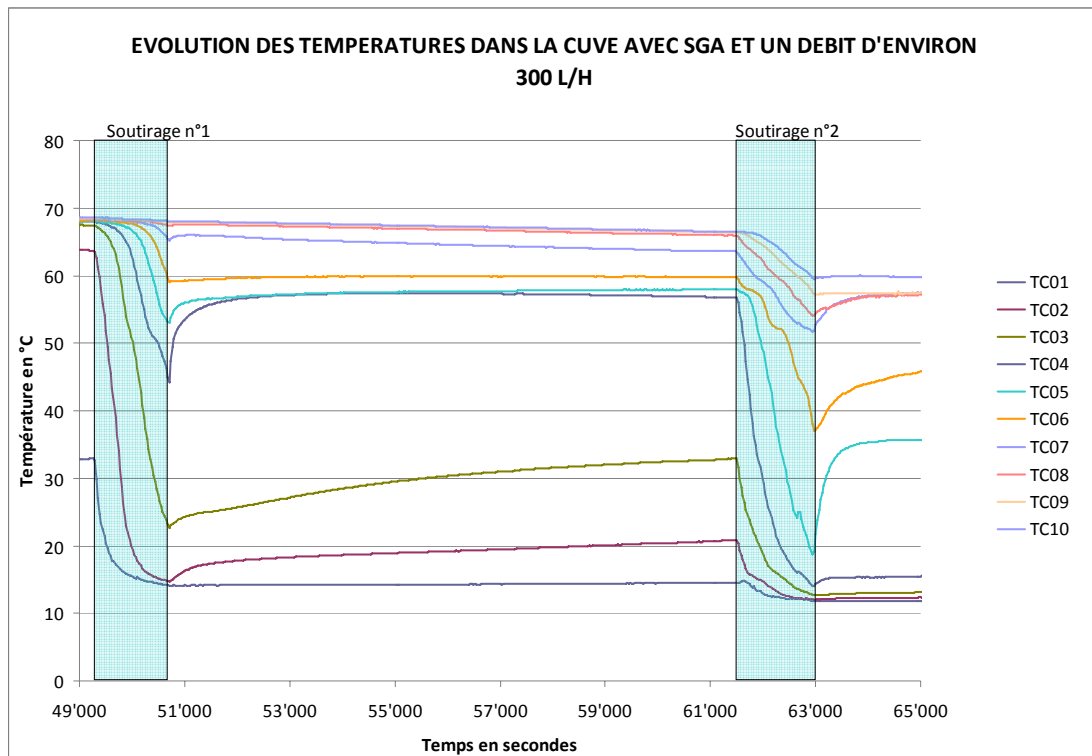


FIGURE 18: EVOLUTION DES TEMPERATURE DANS LA CUVE AVEC SGA ET UN DEBIT DE 1000 L/H



**FIGURE 19: EVOLUTION DES TEMPERATURES DANS LA CUVE AVEC SGA ET UN DEBIT DE 300 L/H**

Sur les Figure 18 et Figure 19, nous pouvons observer le premier soutirage d'eau chaude sanitaire à deux débits différents.

Lors de l'arrêt du soutirage, on peut constater que les PCM restituent l'énergie emmagasinée lors du changement de phase (Temps ~ 51'000 [s] et 61'000 [s]). Cela se traduit par une augmentation de température lors de l'arrêt du soutirage.

#### **2.4.4 EVOLUTION DES TEMPERATURES DANS LA CUVE AVEC LA PARAFFINE RT27**

Lors du second test avec acquisition de l'énergie électrique, nous avons eu une coupure de réseau informatique ce qui a eu pour effet de laisser enclenché le corps de chauffe électrique. Ainsi une partie des bouteilles de RT27 ont été endommagées par surpression. De ce fait, il ne nous a pas été possible d'effectuer d'autres tests avec la RT27 avec la mesure de puissance électrique.

Toutefois, après validation du modèle TRNSYS, nous avons utilisé ce modèle pour définir la puissance moyenne fournie pendant les phases de chauffe. De cette manière, nous avons pu exploiter les résultats obtenus lors des premiers tests sans acquisition de l'énergie électrique.

Voici donc les graphiques de l'évolution de la température dans la cuve remplie de RT27 dans sa phase de chauffe :

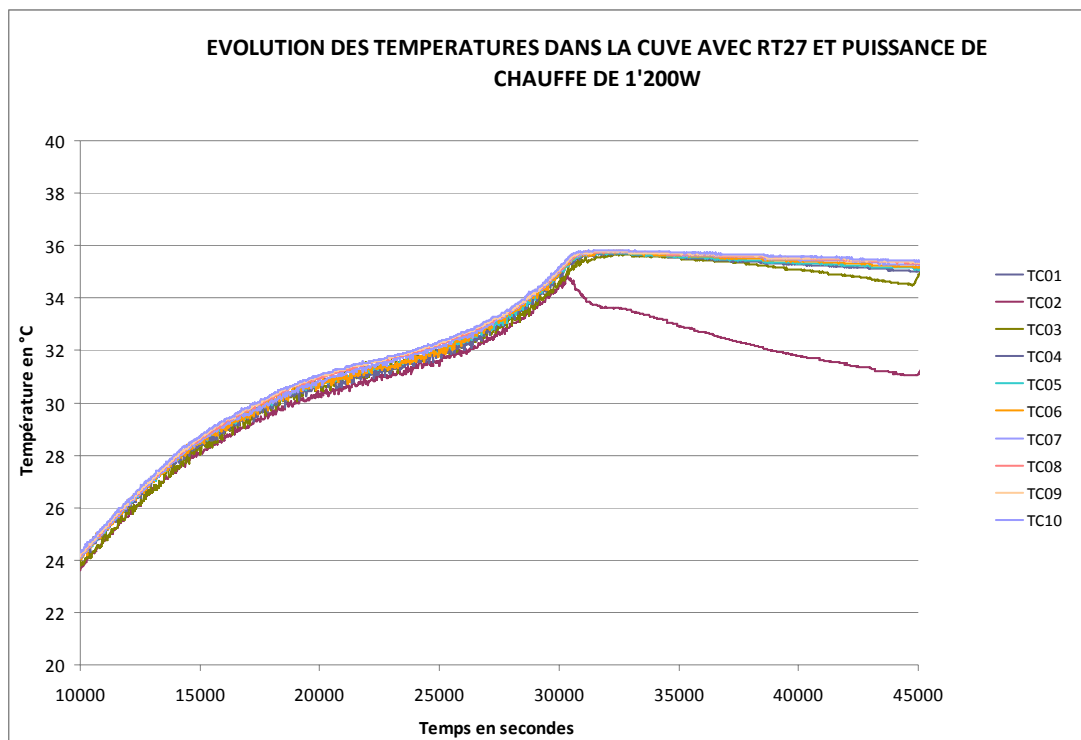


FIGURE 20: EVOLUTION DES TEMPERATURES DANS LA CUVE AVEC RT27 ET PUISSANCE DE 1'200W

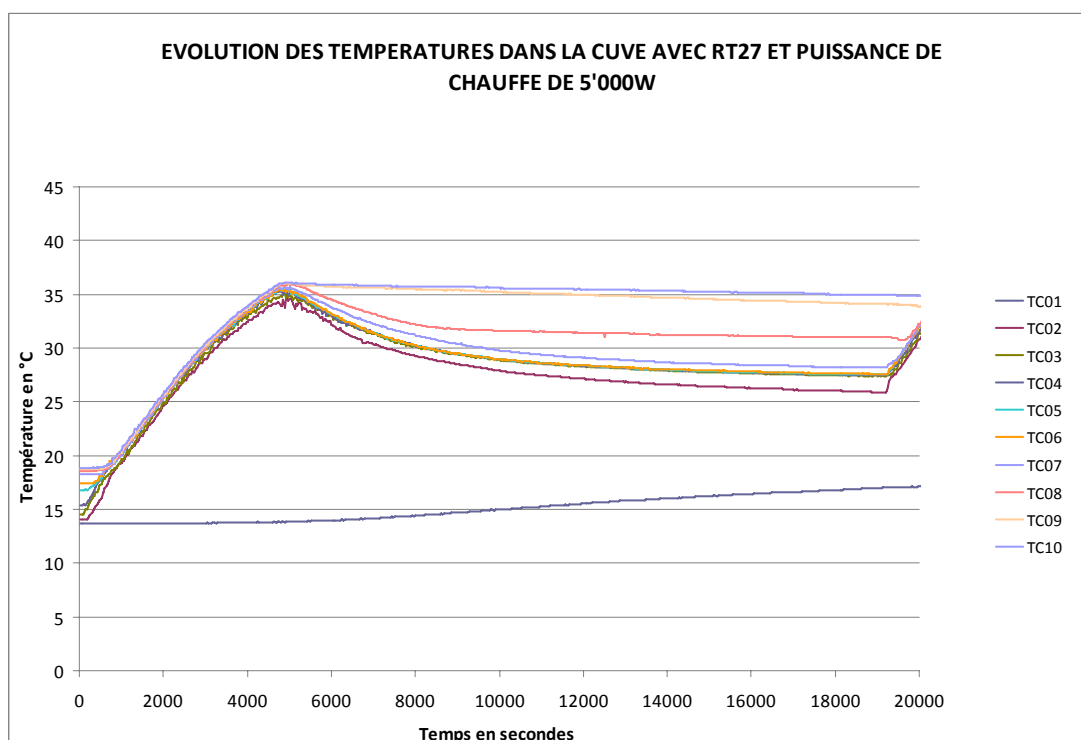


FIGURE 21: EVOLUTION DES TEMPERATURES DANS LA CUVE AVEC RT27 ET PUISSANCE DE 5'000W

Sur les graphiques des Figure 20 et Figure 21, nous constatons que la RT27 n'est pas stabilisée après un temps d'attente entre chaque enclenchement du corps de chauffe (~ 4 heures). Ceci est dû essentiellement à la faible conduction thermique de la paraffine.

## 2.5 COMPARAISONS MESURES – SIMULATIONS

Alors que pour l'eau et la paraffine RT27 les simulations correspondent aux mesures, nous avons constaté que celles réalisées avec SAG ne correspondaient pas exactement lors de la charge avec le corps de chauffe électrique. Nous avons ainsi modifié la courbe enthalpique du SAG comme représenter dans la Figure 22. Cette modification de la courbe enthalpique reste modeste au vue des difficultés à définir cette même courbe par expérimentation soit par DCS soit par la T-history method [5].

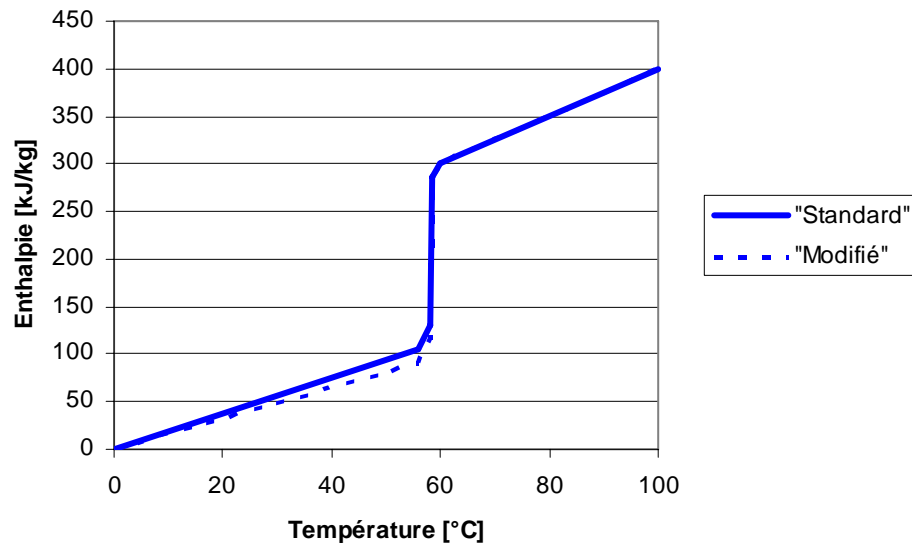


FIGURE 22: COURBE ENTHALPIQUE POUR L'ACETATE DE SODIUM AVEC GRAPHITE (SAG). EN TRAIT PLEIN, LA COURBE "STANDARD". EN POINTILLES, LA COURBE MODIFIEE POUR LES SIMULATIONS.

L'énergie soutirée varie de 19 à 20 kWh pour les tests avec de l'eau ou du SAG et de 9 à 10 kWh pour la RT27. La différence entre les mesures et les simulations est comprise entre 2 à 3% sauf pour la RT27 avec la charge thermique de 1kW où la différence est de 5%.

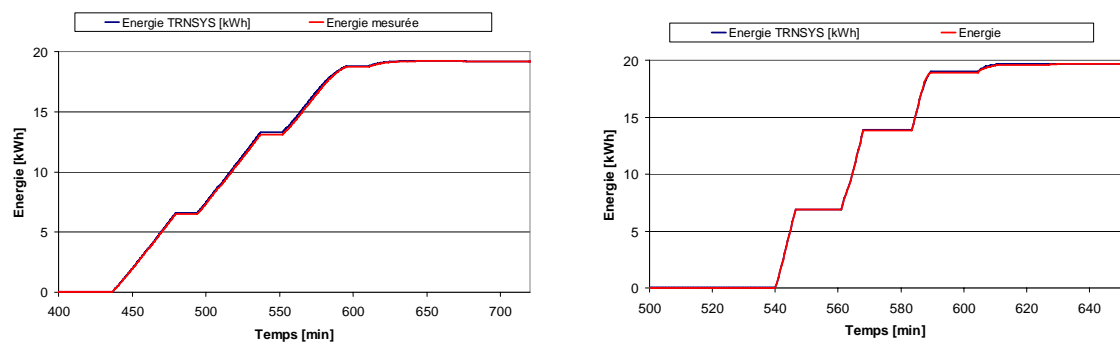
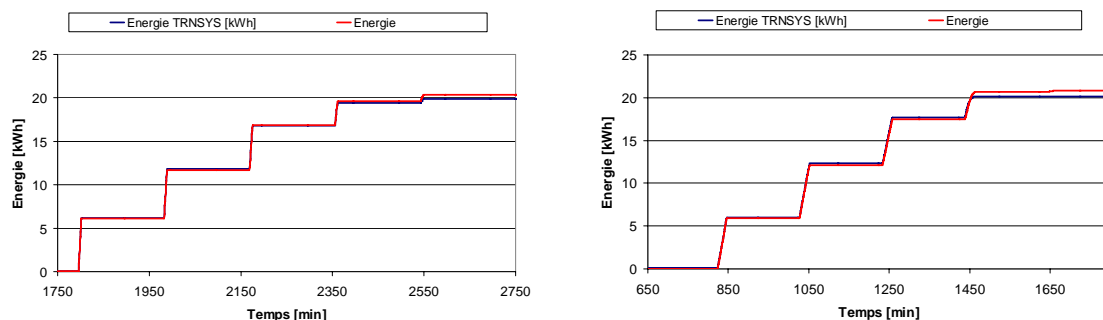
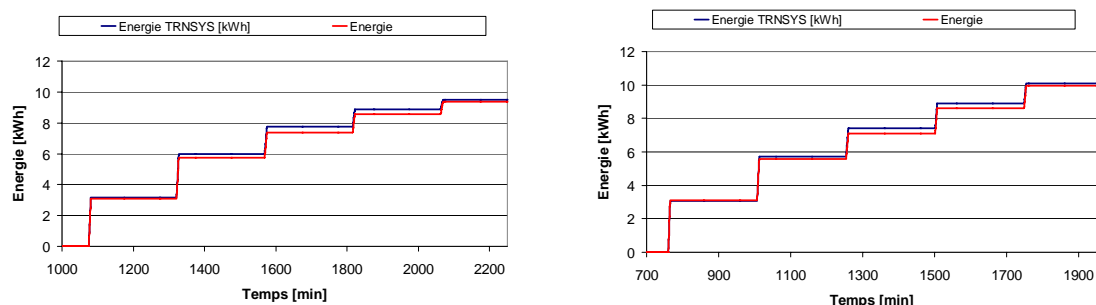


FIGURE 23: COMPARAISON ENTRE MESURES ET SIMULATION POUR DE L'ENERGIE SOUTIREE AVEC UN DEBIT RESPECTIVEMENT DE 150 ET 1000 L/H DANS LA CUVE REMPLIE D'EAU.



**FIGURE 24: COMPARAISON ENTRE MESURES ET SIMULATION POUR DE L'ENERGIE SOUTIREE AVEC UN DEBIT RESPECTIVEMENT DE 150 ET 1000 L/H DANS LA CUVE REMPLIE D'EAU AVEC DU SAG.**



**FIGURE 25: COMPARAISON ENTRE MESURES ET SIMULATION POUR DE L'ENERGIE SOUTIREE AVEC UN DEBIT RESPECTIVEMENT DE 150 ET 1000 L/H DANS LA CUVE REMPLIE D'EAU AVEC DE LA RT27.**

Durant la phase de chauffe, la comparaison entre les mesures et les simulations sont très bonnes (voir l'annexe 9.1). Lors des soutirages d'eau chaude sanitaire, la différence de température entre les mesures et les simulations sont plus importantes car le gradient de température dans la cuve est élevé. En effet, la discrétisation du modèle de cuve additionnée à de légères différences de la quantité d'eau soutirée entre les mesures et les simulations entraînent une comparaison fine des températures difficile. Afin d'améliorer la précision des simulations, on a augmenté le nombre de nœud de simulation dans la cuve. Il en résulte qu'un nœud du modèle numérique ne correspond pas forcément à un thermocouple expérimental. Toutefois, la quantité d'énergie soutirée mesurée correspond à celle simulée comme le montre les Figure 23 à 25.

### 3 RÈGLE DE DIMENTIONNEMENT

Le but de ces simulations est d'obtenir des règles de dimensionnement pour définir quelle puissance de charge ou de décharge est-il possible de réaliser en fonction de la taille des containers de PCM, du volume de la cuve et du type de matériaux à changement de phase. Pour cela nous avons fait varier le volume de la cuve de 125 à 4000 litres, le diamètre des containers de 10 à 160 mm, la puissance de soutirage de 1 à 64 kW et nous avons utilisé deux types de PCM :

- l'acétate de sodium avec du graphite (SAG)
- la paraffine

Les deux principales différences entre ces matériaux sont :

- le coefficient de conduction thermique –  $\lambda=4$  [W/m.K] pour le SAG et 0,2 pour la paraffine.
- L'allure de la courbe – Pour le SAG la transformation a lieu pour  $\Delta T$  de 4 [K] alors que pour la paraffine cette transformation s'effectue en 11 [K]. Ce paramètre est important lorsque la charge ou la décharge se fait avec une faible différence de température. Effectivement, il faut être certain que le changement de phase soit complet et soit compris dans la plage de température utilisée.

Les différents paramètres utilisés lors des simulations, sont :

|                              |     |     |     |      |      |      |    |
|------------------------------|-----|-----|-----|------|------|------|----|
| Diamètre des containers [mm] | 10  | 30  | 50  | 80   | 160  |      |    |
| Volume de la cuve [litres]   | 125 | 250 | 500 | 1000 | 2000 | 4000 |    |
| Puissance de soutirage [kW]  | 1   | 2   | 4   | 8    | 16   | 32   | 64 |

#### PARAMÈTRES VARIABLES

##### 3.1.1 DIAMÈTRE ET NOMBRE DES CONTAINERS

Le transfert thermique entre l'eau et le PCM fait intervenir différents phénomènes. Dans un premier temps, le flux de chaleur passe de l'eau au container par convection libre. En effet, le débit dans une cuve n'est en général pas suffisant pour que la convection forcée soit prépondérante. La grandeur de la surface d'échange est donc un paramètre utilisable pour faire évoluer le flux de chaleur. Une manière simple d'augmenter la surface d'échange est de diminuer le diamètre des containers comme le montre la Figure 26.

Le fait de diminuer le diamètre des containers peut entraîner une augmentation de la masse de matériau utilisé pour le container lui-même et par là une réduction du pourcentage de PCM.

Dans un deuxième temps, le flux de chaleur se transmet dans le matériau par conduction et par convection en phase liquide du PCM. Nous ferons évoluer la conductibilité des PCM. Dans la pratique, il existe des graphites expansés tels que celui utilisé avec l'acétate de sodium. D'autres essais ont été réalisés sans être disponibles dans le commerce [6] à [9]. Il ne nous paraît pas raisonnable d'aller au-delà d'un coefficient de conduction supérieur à environ 20 [W/m.K]. Effectivement, si nous ajoutons trop d'élément conducteur la part de PCM diminuera. Dans le cadre de notre étude, nous nous bornerons aux deux valeurs obtenus avec le SAG et la paraffine, soit respectivement 4 et 0,2 [W/m.K].



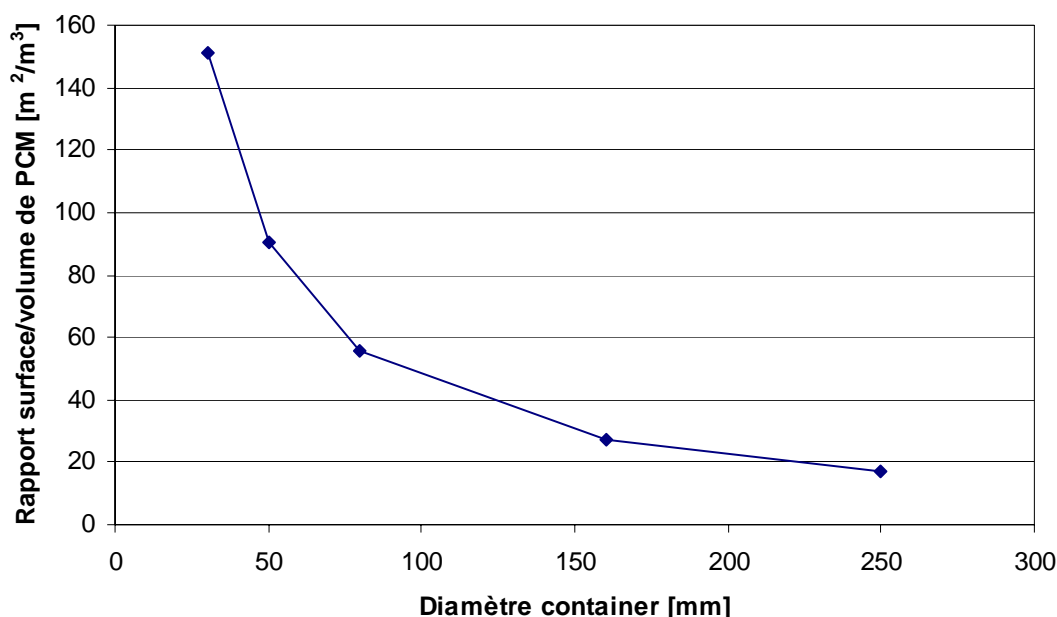


FIGURE 26: EVOLUTION DU RAPPORT SURFACE D'ÉCHANGE DE CHALEUR EAU/PCM AVEC LE VOLUME DE PCM EN FONCTION DU DIAMÈTRE DU CONTAINER.

### 3.1.2 POURCENTAGE DE PCM ET $\Delta T$ UTILISABLE

Le pourcentage de PCM a évidemment une influence sur le rapport de capacité de stockage d'énergie. Comme nous l'avons précisé au chapitre 2.5, avec une cuve remplie d'eau, il est constructivement difficile de mettre plus de 50% de PCM en volume. Que ce soit avec des formes cylindriques, sphériques ou par plaque, ce pourcentage maximum varie peu. Seule une disposition rhomboédrique de sphères permettrait d'obtenir environ 65 %. Dans ce cas, il faudrait les positionner manuellement.

La différence de température entre deux moments influence également le rapport de capacité de stockage d'énergie dans une cuve avec un certain pourcentage de matériaux à changement de phase. Pour un petit  $\Delta T$ , autour de la température de fusion du matériau, nous aurons un grand rapport de capacité de stockage.

Le graphique de la Figure 27, illustre ce propos avec les 2 types de PCM utilisé. La densité plus faible de la paraffine entraîne une moins bonne capacité de stockage que le SAG. Les  $\Delta T$  sont identiques pour la RT27 et le SAG, mais les températures considérées sont différentes et sont en fonction de la température de transformation de chaque matériau.

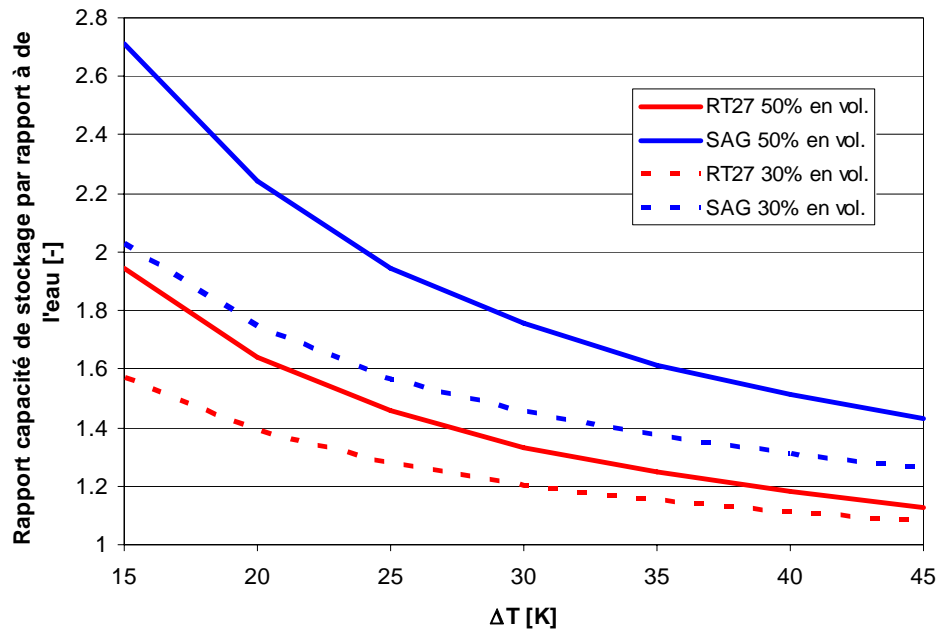


FIGURE 27: RAPPORT DE CAPACITÉ DE STOCKAGE D'ÉNERGIE DANS UNE CUVE REMPLIE AVEC UN CERTAIN POURCENTAGE DE PCM ET UNE CUVE REMPLIE EXCLUSIVEMENT D'EAU.

Au vue de ce graphique, nous ferons des simulations avec un  $\Delta T$  de 15 [K] pour un pourcentage de PCM de 50% en volume.

### 3.1.3 COURBES ENTHALPIQUES UTILISÉES POUR LES SIMULATIONS

Les deux matériaux utilisés pour cette étude par simulation sont l'acétate de sodium avec du graphite et de la paraffine. Afin de comparer les résultats, nous effectuerons des simulations avec des PCM ayant une température de fusion proche l'une de l'autre, soit SAG (58 [°C]) et la paraffine RT54 (54 [°C]). Les graphiques de la Figure 28 représentent les courbes enthalpiques pour ces deux matériaux en [kJ/kg] pour le premier et en [kJ/dm<sup>3</sup>] pour le second, prenant en compte la différence de densité entre le SAG et la paraffine.

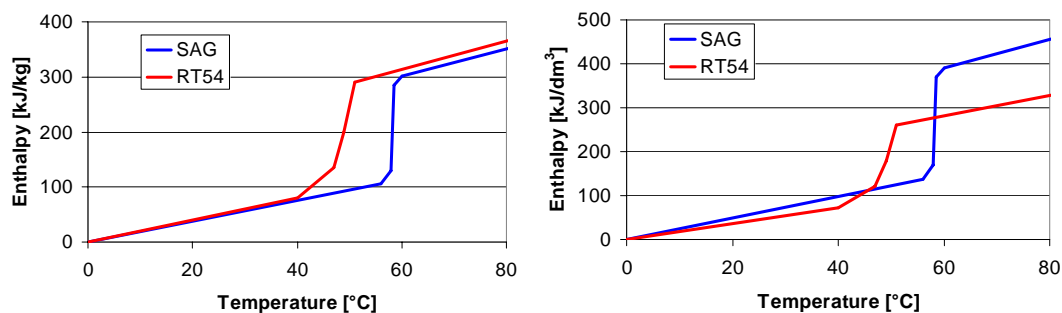


FIGURE 28: COURBE ENTHALPIQUE DE LA PARAFFINE RT54 ET DE L'ACÉTATE DE SODIUM AVEC DU GRAPHITE (SAG).

### 3.2 CRITÈRES DE VALIDATION

Il faut déterminer les critères à partir desquels l'emploi de modules de matériaux à changement de phase n'est plus intéressant. Comme premier critère, nous avons défini qu'en dessous d'un certain pourcentage de la puissance nominale, le PCM n'est plus utilisable avec efficacité. Pour le SAG, la limite acceptable de puissance d'utilisation des PCM a été choisie pour une diminution de 10% de la puissance nominale. Dans la Figure 29 cette limite est représentée par la droite verte horizontale.

Le deuxième critère est défini par rapport au moment où la puissance nominale de soutirage chute pour une cuve remplie uniquement d'eau. Le temps  $t_1$  est alors multiplié par un facteur 2 pour obtenir la limite de temps de l'acétate de sodium (SAG). Cette limite temporelle est représentée par la droite verte verticale sur le graphique de la Figure 29.

La combinaison de ces deux critères revient à fixer un temps de restitution double à celui obtenu avec de l'eau pour une puissance supérieure à 90% de la puissance nominale. Ainsi l'énergie stockée avec le PCM doit être au moins supérieure à 180% de l'énergie stockée uniquement avec de l'eau.

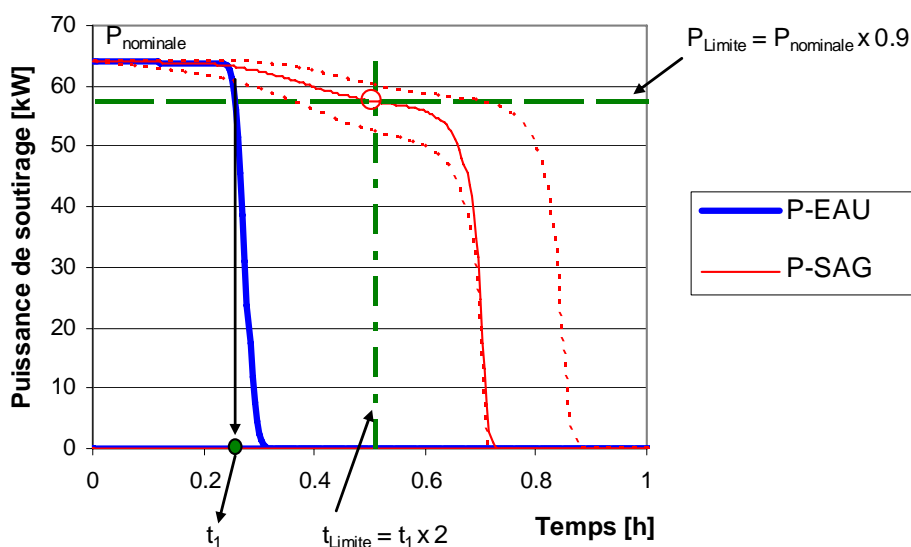
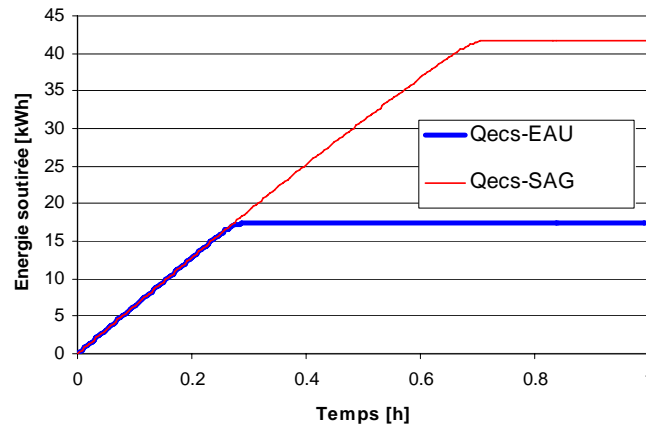


FIGURE 29: DÉTERMINATION DES CRITÈRES LIMITES D'UTILISATION DES PCM.

Le croisement de ces deux droites donne un point (cercle rouge) en dessous duquel la courbe de la puissance de soutirage ne devrait pas se situer. Par exemple la courbe rouge en pointillé en-dessous de ce point illustre une puissance de soutirage qui est trop faible. Ainsi, soit la puissance fournie soit l'énergie stockée est insuffisante, et dans ce cas les valeurs de simulation ne sont pas retenues.

A l'inverse, la courbe pointillée qui se situe au-dessus de ce point, remplit largement les critères et alors les résultats de simulation sont retenus. La courbe rouge en trait plein représente le cas limite d'une configuration acceptable selon nos critères.

La Figure 30 représente la quantité d'énergie soutirée correspondant aux courbes en trait plein du graphique de la Figure 29. La cuve utilisée est de 1000 litres avec une puissance nominale de soutirage de 64 kW pour des containers d'un diamètre de 10 mm remplis de SAG.



**FIGURE 30: ENERGIE SOUTIRÉE POUR UNE CUVE DE 1000 LITRES AVEC OU SANS PCM (SAG). PUISSANCE DE SOUTIRAGE : 64 KW AVEC DES CONTAINERS DE 10 MM DE DIAMÈTRE.**

Pour la paraffine, nous prenons une diminution de 15% la puissance nominale. En effet, comme le montre la Figure 28, la transformation de phase de la paraffine s'effectue avec un  $\Delta T$  de 11 [K]. Ceci entraîne une diminution de la puissance à disposition lorsque que le  $\Delta T$  d'utilisation est de 15 [K] puisque dans le cas la différence de température entre l'eau et le module de PCM est faible. Si nous gardions les 10%, le potentiel d'utilisation des PCM serait presque nul. La limite temporelle est de 1,8 fois supérieur à celle de l'eau puisque la capacité de stockage est plus faible que pour le SAG (voir la Figure 27).

## 4 ABAQUE DE DIMENTIONNEMENT

Les graphiques de la Figure 31 pour le SAG et la Figure 32 pour le RT54 synthétisent les résultats des simulations effectuées selon les paramètres et les critères présentés ci-dessus. Les différentes zones de couleur correspondent à divers diamètres de container. Il est à noter que ces graphiques sont réalisés selon les critères du chapitre 3.2 et ne sont valables que dans ce cadre (cf Figure 29).

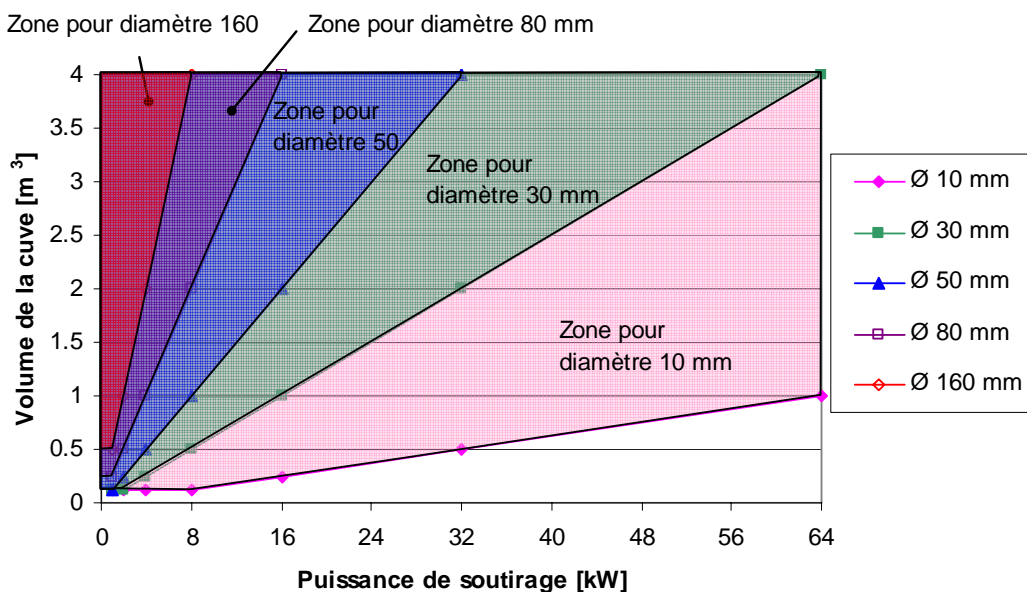


FIGURE 31: DOMAINES D'UTILISATION DE L'ACÉTATE DE SODIUM AVEC DU GRAPHITE (SAG).

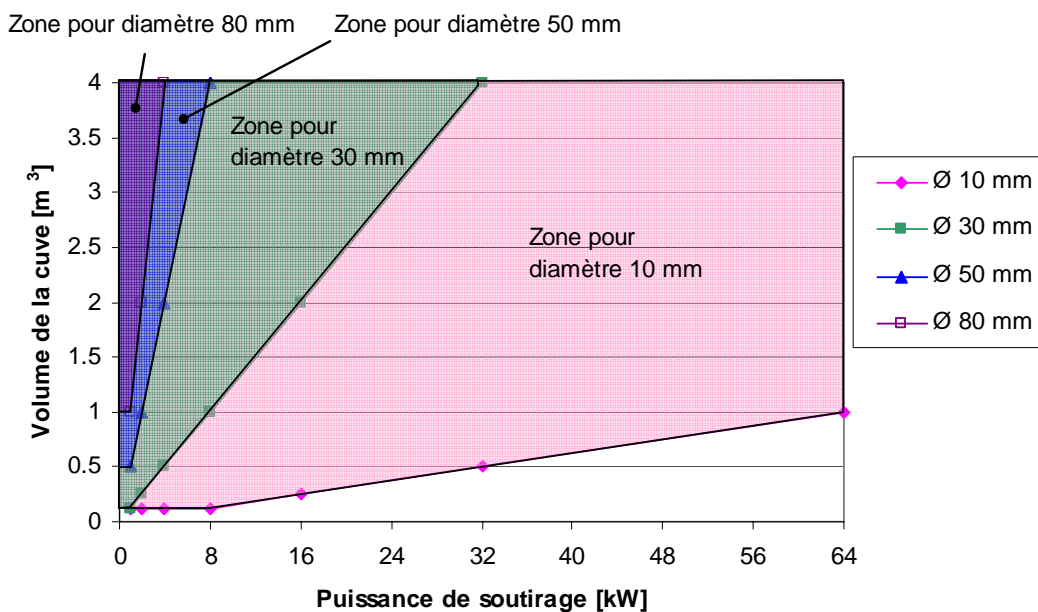


FIGURE 32: DOMAINES D'UTILISATION DE LA PARAFFINE RT54.

Pour une dimension réduite des containers, l'influence de la conduction thermique du matériau est négligeable. Ainsi, nous constatons que la zone rose pour un diamètre de container de 10 mm est la même pour le SAG et la paraffine.

Pour de petite cuve, les containers de diamètre supérieur à 50 mm ne semblent pas adaptés aux PCM utilisés dans notre étude, soit un coefficient de conduction de 4 [W/m.K] au maximum. Par exemple, avec du SAG et un diamètre de 50 mm, il faudrait une cuve de 2000 litres pour pouvoir soustraire 16 kW de puissance. Pour du stockage saisonnier avec des volumes de cuve importants, les diamètres de container peuvent être plus grands.

Toutefois, il ne faut pas oublier que le coût du module de PCM augmente avec la diminution de son diamètre lié à la fabrication des containers. Pour information, avec 50% de PCM en volume, dans une cuve de 1000 litres il faut environ 400 containers de diamètre 30 mm et 3700 pour un diamètre de 10 mm. En plus du coût, cela entraîne également des problèmes constructifs à résoudre.

#### 4.1 DIMINUTIONS DES EMISSIONS IMBRULEES DANS UNE CHAUDIERE.

L'utilisation d'un stock tampon avec une chaudière permet de diminuer le nombre d'enclenchement et de déclenchement du brûleur. La concentration de monoxyde de carbone et d'imbrûlés est très élevée lors de ces phases d'enclenchement et de déclenchement du brûleur (Figure 33).

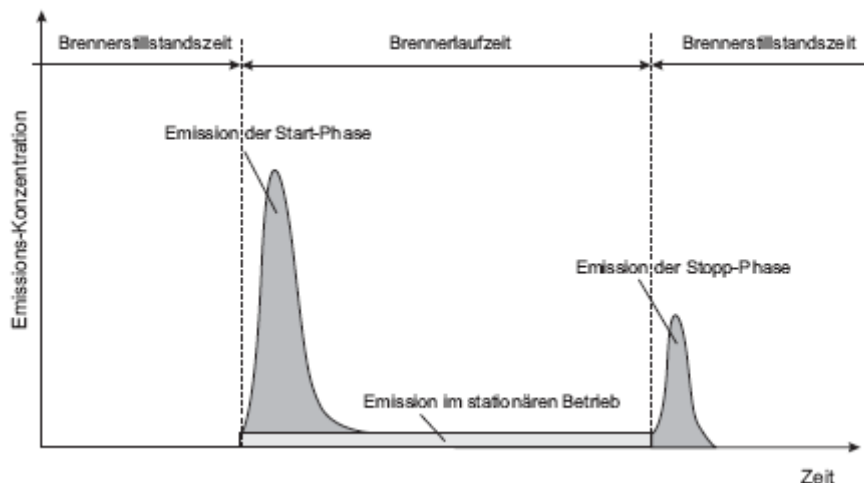


FIGURE 33: EVOLUTION DE LA CONCENTRATION DE CO ET D'HYDROCARBURES IMBRÛLÉS LORS D'UN CYCLE D'ENCLenchement ET DE DÉCLenchement D'UN BRÛLEUR [2].

L'idée est de diminuer le plus possible le volume de la partie stockage d'énergie afin d'augmenter le temps de chauffage et donc de réduire le nombre d'enclenchement. L'utilisation de PCM semble être une solution envisagée. Pour une chaudière de 10 kW et selon les graphiques des Figure 31 et Figure 32, il faudrait une cuve de 100 à 150 litres avec des containers de 10 mm de diamètre. Dans ce cas, le coût de l'installation serait à étudier puisqu'il faudrait un millier de containers. Avec un diamètre de 30 mm, il n'en faudrait plus qu'une centaine ce qui reste encore élevé. De plus, la différence de température du circuit de chauffage selon la saison implique une augmentation du  $\Delta T$  dans la cuve et ainsi une diminution du gain en volume tel qu'il est montré à la Figure 27.

## 5 IMPACTS ENVIRONNEMENTAUX DU SAG

Dans le rapport précédent [9], nous avons effectué une étude des impacts environnementaux pour déterminer quelle était la part des impacts des PCM 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. Cette étude avait été effectuée pour de la paraffine RT et de son récipient (bouteille en aluminium).

Bien qu'expérimentalement, nous avons également utilisé du sodium acétate avec du graphite (SAG), nous n'avons pas pu effectuer l'analyse du cycle de vie de ce PCM, car des données de bases étaient manquantes. Entre temps, nous avons mandaté ESU-Services, pour qu'il puisse déterminer les impacts du SAG. Cette étude se trouve en annexe.

A partir de ces données complémentaires, nous avons complété l'analyse du cycle de vie du combi-système avec du SAG et de son récipient (bouteille en aluminium).

Le système étudié, la méthodologie utilisée et les indicateurs retenus sont les mêmes que pour la paraffine. Pour davantage d'informations sur le sujet, il est possible de se référer au rapport précédent [9]. Nous ne présentons ici seulement les résultats obtenus avec le SAG.

### 5.1 IMPACTS DU SAG

Pour les calculs effectués pour cette étude, nous avons repris les valeurs obtenus par l'ESU-Services pour le SAG pour la production et pour l'élimination. Pour l'élimination, on séparera le SAG du récipient. Ce dernier, en aluminium, sera recyclé. L'élimination du SAG se fera par incinération, comme indiqué dans le rapport et confirmé par différentes sources.

La Figure 34 donne les valeurs des impacts du SAG par kilo de matière pour les indicateurs NRE et GWP.

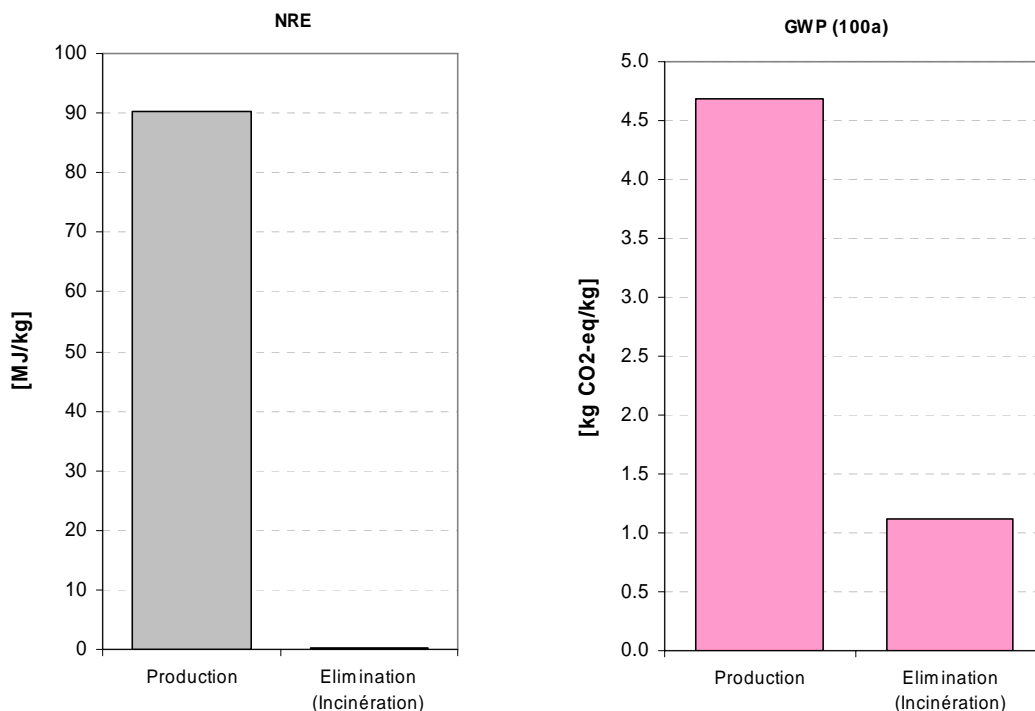
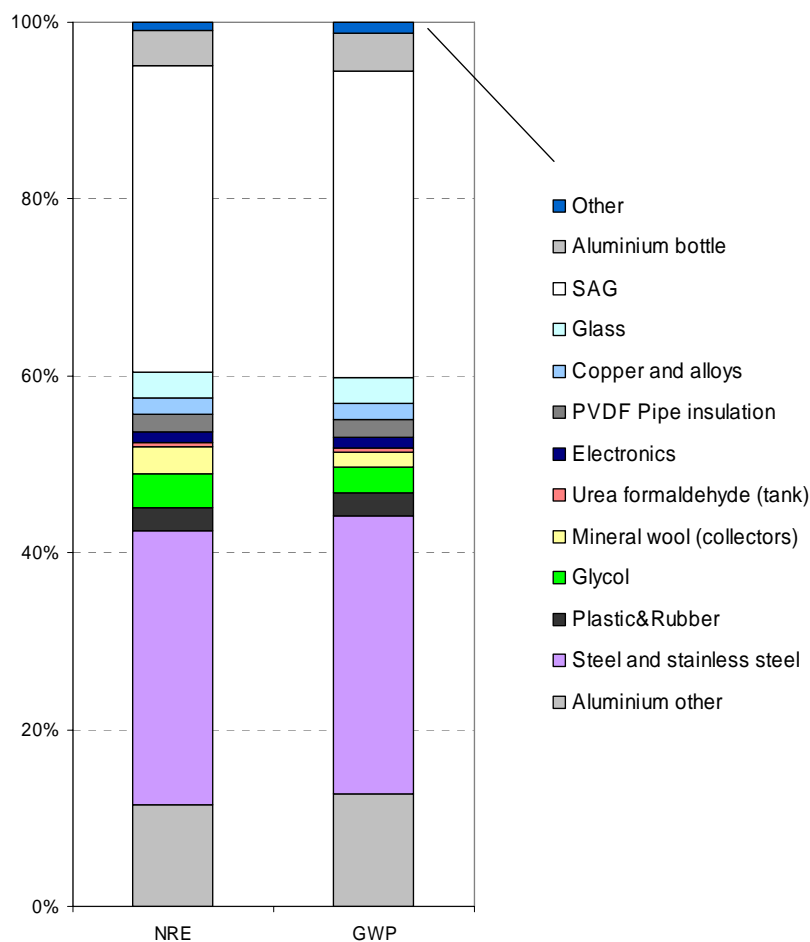


Figure 34 Valeurs des impacts du SAG (valeurs tirés de l'étude d'ESU-Services)

Pour la suite de cette étude, il est fait comme hypothèse que le SAG ne sera pas remplacé durant la durée de vie du combi-système. En effet, personne n'a de recul avec ce matériau pour connaître son comportement au cours du temps. Nous avons donc pris la situation la plus favorable pour le SAG. Toutefois, si dans le futur on constate que le SAG n'est pas stable sur la durée de vie du combi-système (20 ans), il faudra le remplacer. A chaque remplacement du SAG, il faudra augmenter ses impacts de production et d'élimination. Dans la réalité, les impacts du SAG seront donc égaux ou supérieurs à ceux qui sont calculés dans cette étude, en fonction du nombre de remplacement du SAG au cours de la durée de vie du combi-système.

La Figure 35 montre la part relative des impacts des différents constituants du combi-système en incluant le SAG.



**Figure 35 Impacts relatifs des différents matériaux composants le combi-système Arpège avec le SAG.**

Dans l'étude précédente, on constatait que la paraffine représentait environ 25% des impacts totaux pour le NRE et 10% des impacts pour le GWP. Pour le SAG, les impacts sont plus importants. On a par indicateur les valeurs suivantes :

| Indicateur      | SAG<br>[% du total] | Récipient (aluminium)<br>[% du total] | SAG + Récipient<br>[% du total] |
|-----------------|---------------------|---------------------------------------|---------------------------------|
| NRE [MJ]        | 34.7                | 3.9                                   | 38.6                            |
| GWP [kg CO2-eq] | 34.5                | 4.3                                   | 38.8                            |



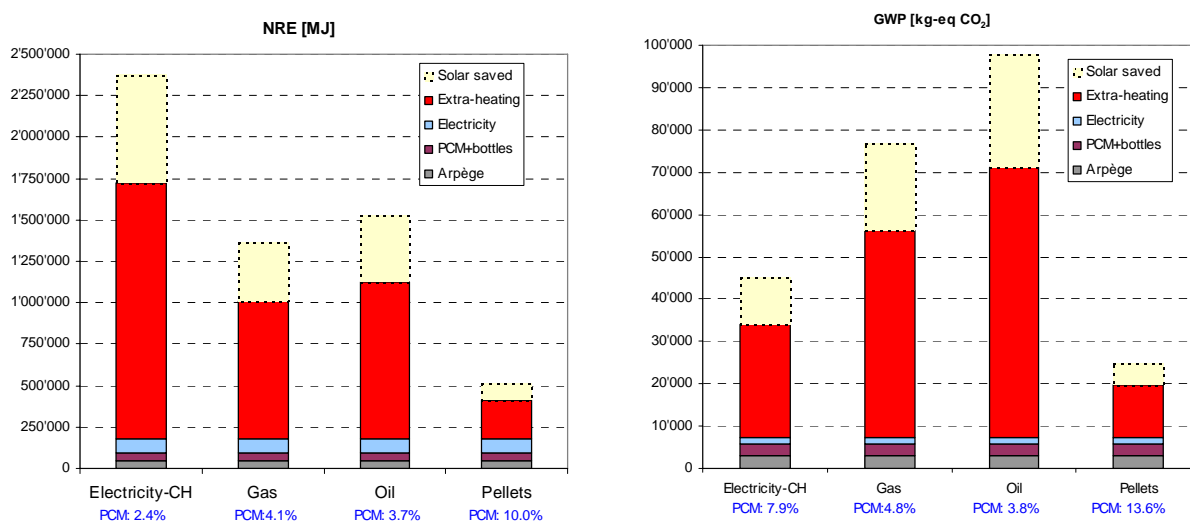
Les impacts environnementaux du SAG et du récipient sont importants quand ils sont comparés aux impacts des autres matériaux constituant le combi-système, car ils représentent plus du tiers des impacts totaux.

### 5.1.1 SYSTÈME COMPLET : MATÉRIAUX ET ENERGIE

Pour effectuer une analyse du cycle de vie complète du combi-système, il faut tenir compte de l'énergie d'appoint consommée durant la phase d'utilisation. Pour la prise en compte de cette énergie, 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)
- Chaudière à pellets (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 36.



**Figure 36 Valeurs d'impacts GWP et NRE pour les différentes énergies d'appoint pour une durée de fonctionnement de vie du combi-système de 20 ans. Les valeurs PCM X%, indiquent la part des impacts du PCM par rapport à l'ensemble des impacts (sans le solaire).**

Dans la Figure 36, les résultats ont été regroupés en 4 catégories :

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

Dans la Figure 36, la zone en pointillé indique les impacts de l'énergie d'appoint économisée par l'apport du solaire, donc 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 36 indiquent que la plus grande part des impacts est liée à la consommation d'énergie d'appoint. La part liée aux PCM représente un impact non négligeable qui peut dépasser 10% des impacts totaux dans le cas d'un appoint à pellets. Il faut rappeler que ne connaissant pas la durée de vie du SAG nous avons été optimistes en retenant l'hypothèse de la stabilité du PCM sur la durée de vie de l'installation, soit 20 ans.

Même avec cette hypothèse optimiste, il ressort que la réduction des impacts liée à l'économie d'énergie d'appoint engendrée par l'utilisation de PCM est toujours inférieure ou égale à l'augmentation des impacts lié à l'utilisation du PCM dans le système, sauf pour le NRE dans le cas de l'électricité. Nous avons supposé que la durée de vie du PCM était également de 20 ans.

Ainsi, si le SAG devait être changé, ne serait-ce qu'une seule fois durant la durée de vie du combi-système, la réduction des impacts liée à l'économie d'énergie d'appoint engendrée par l'utilisation de PCM serait toujours inférieure à l'augmentation des impacts liés à l'utilisation du PCM dans le système. Donc pour la faible augmentation des performances du combi-système obtenue, il ressort que le SAG n'est pas une solution intéressante au point de vue des impacts environnementaux générés par l'installation solaire durant son cycle de vie.

## 6 CONCLUSION

L'objectif de cette étude visait à quantifier la relation qui existe entre la puissance fournie par un appoint et la capacité de stockage d'un matériau à changement de phase (PCM).

Pour les besoins de la présente étude, nous avons utilisé un modèle numérique développé dans le cadre d'un projet précédent. Ce modèle a été perfectionné et adapté pour les besoins spécifiques de ce projet. Une série de mesures expérimentale a été effectuée sur un banc de mesures développés pour valider les résultats de simulation.

Afin de déterminer les plages d'application des PCM étudiés (paraffine et acétate de sodium avec graphite), nous avons effectués une analyse de sensibilité en faisant varier la puissance de l'appoint, le volume de stockage et le diamètre des modules de PCM.

Cette analyse montre que plus la puissance de soutirage est grande, plus le diamètre des modules de PCM doit diminuer. Cette diminution du diamètre des modules de PCM est d'autant plus rapide que la conductibilité thermique est faible. Par exemple, pour une puissance de soutirage de 10 kW, il est recommandé d'utiliser des modules de 10 mm de diamètre avec de la paraffine et de 30 mm de diamètre avec le SAG, pour un volume de stockage de 800 litres. On remarque donc que pour des petits volumes de stockage et de grande puissance de soutirage, le coût engendré par le nombre de petits modules à fabriquer devient prohibitif par rapport à l'économie d'énergie engendrée. Toutefois, il est difficile d'articuler un coût pour une fabrication industrielle de ces modules. L'utilisation des PCM dans une cuve en eau semble donc peu intéressante pour des applications de soutirage de grande puissance comme par exemple pour la diminution du nombre de cycle d'un brûleur.

Pour des installations de quelques kW de puissance et des volumes de stockage de plusieurs m<sup>3</sup>, le diamètre des modules peut atteindre 50 à 80 mm de diamètre. Toutefois, il faudra un grand nombre de modules de PCM, ce qui limitera l'intérêt économique de l'utilisation des PCM.

De point de vue environnemental, l'utilisation de SAG comme PCM augmente les impacts totaux de l'installation solaire avec ce PCM. En effet, l'augmentation des impacts due à la présence du SAG et de son récipient en alu dans le stock d'eau, n'est pas contrebalancée par la diminution des impacts dues à la réduction d'énergie d'appoint (2-3 %). Etant donné ces résultats, il n'est pas recommandé d'utiliser du SAG pour le stockage d'énergie dans un combi-système.

## 7 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 tout au long de cette Tâche 32.

## 8 RÉFÉRENCES

- [1] S. Citherlet, J. Bony, Simulation and optimization Report System, 2007.
- [2] W. Streicher et al., Erhöhung von solarem Deckungsgrad und Kesselnutzungsgrad und Emissionsverringern durch verringertes Takten, 2007.
- [3] A. Heinz, L. Cabeza, mesures enthalpiques de l'acétate de sodium avec du graphite et de la paraffine.
- [4] F. Pfeiffer et al., Start- und Stopp-Emissionen von Öl- und Gasfeuerungen.
- [5] José M Marín, Belén Zalba, Luisa F Cabeza and Harald Mehling, Determination of enthalpie-temperature curves of phase change materials with the temperature-history method, Measurement Science and Technology, 2003.
- [6] J. Fukai et al., Effect of carbon-fiber brushes on conductive heat transfert in phase change materials, International Journal of Heat and Mass Transfer, 2002.
- [7] R. Velraj et al., Heat Transfer Enhancement in Latent Heat Storage System, Solar Energy, 1999.
- [8] L.F. Cabeza, H. Melhing, S. Hiebler, F. Ziegler, Heat transfer enhancement in water when used as PCM in thermal energy storage, Applied Thermal Engineering, 2002.
- [9] S. Citherlet, J. Bony, Rapport final CoSyPCM, OFEN, 2006.
- [10] Documentation SGL Carbon Group, Allemagne (acetate de sodium avec graphite).
- [11] Documentation Rubitherm, Allemagne (paraffine).

## 9 ANNEXES

### 9.1 COMPARAISONS MESURES – SIMULATIONS

Nous avons effectué des simulations pour chaque test et nous les avons comparées aux mesures. Les graphiques de la Figure 37 illustrent les comparaisons entre différentes sondes dans la cuve pour de l'eau uniquement. La charge thermique de la cuve est réalisée avec une puissance de 5 kW. La partie gauche de la courbe, température montante, représente la période de charge thermique par paliers alors que la partie droite de la courbe, température descendante, correspond aux soutirages d'eau chaude par pas de 100 litres. Le même type de comparaisons est présenté à Figure 38 pour l'acétate de sodium (SAG) et à la Figure 39 pour la paraffine RT27.

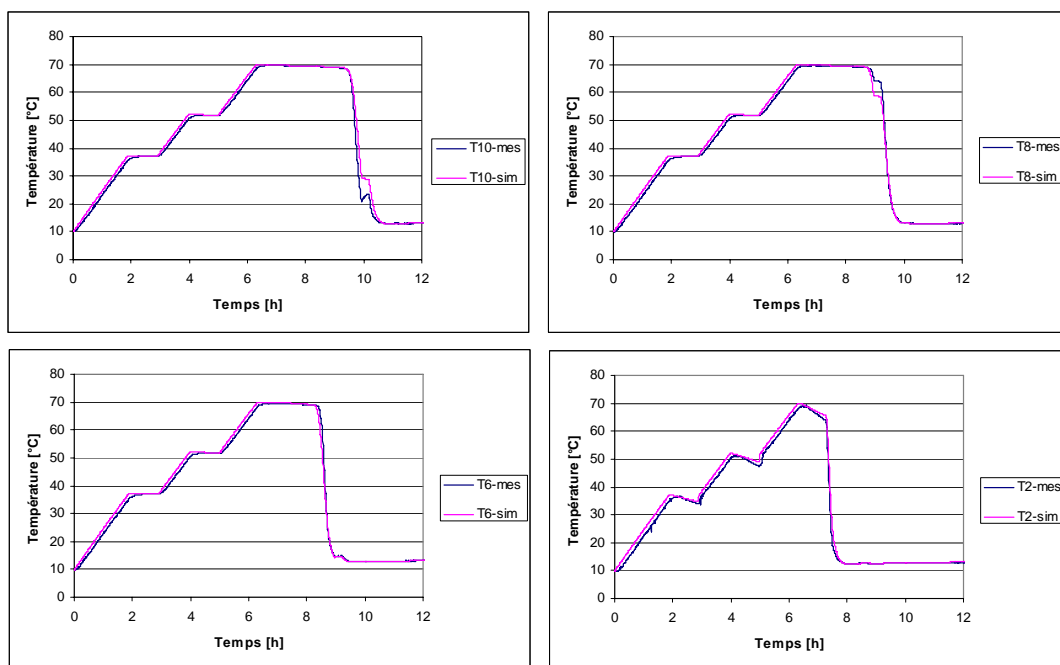
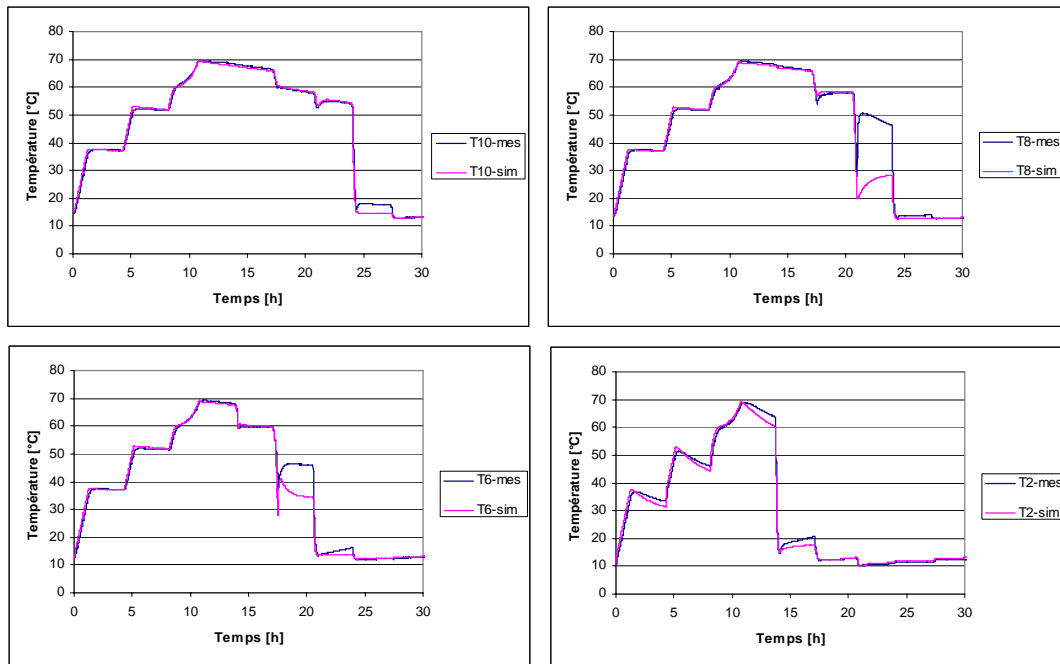
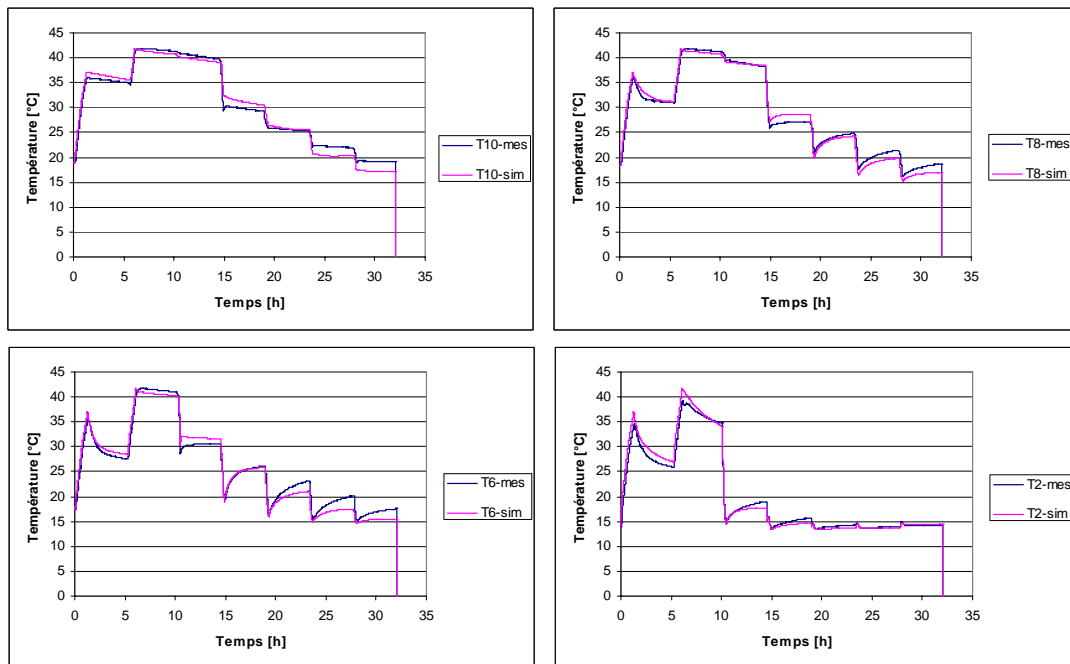


FIGURE 37: TEMPERATURE DANS LA CUVE A DIFFERENTS NIVEAUX POUR LE TEST AVEC DE L'EAU ET UNE PUISSANCE DE CHARGE DE 5 KW.



**FIGURE 38: TEMPERATURE DANS LA CUVE A DIFFERENTS NIVEAUX POUR LE TEST AVEC DU SAG ET UNE PUISSANCE DE CHARGE DE 5 KW.**



**FIGURE 39: TEMPERATURE DANS LA CUVE A DIFFERENTS NIVEAUX POUR LE TEST AVEC LA RT27 ET UNE PUISSANCE DE CHARGE DE 5 KW.**

Lors de la charge thermique de 5 kW avec la paraffine, nous constatons une chute de la température de l'eau. Ce phénomène est dû principalement au faible transfert thermique dans la RT27 (sondes T6 et T8 de la Figure 39) qui induit un changement de phase incomplet. La baisse de la température de la sonde T2 est également due à la proximité de la zone basse de la cuve qui en-dessous du corps de chauffe électrique reste froide.