

Rapport annuel 2006, 15 décembre 2006

CoSyPCM

Combi-Système avec

Matériaux à Changement de Phase

Auteur et coauteur	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 stephane.citherlet @heig-vd.ch
N° projet / n° contrat OFEN	12536
Durée prévue du projet (de - à)	Octobre 2003 à décembre 2007

RÉSUMÉ

Pendant l'année 2006, les travaux suivants ont été effectués :

- Modèle numérique : Amélioration du modèle numérique pour TRNSYS (convection interne au PCM).
- Expérimentation : Une installation solaire combinée a été testée en laboratoire avec et sans PCM. Un bilan thermique et une comparaison ont été établis.
- Des simulations annuelles ont permis de comparer l'installation solaire combinée Arpège en utilisant ou non des PCM.
- Analyse du cycle de vie d'une installation solaire combinée avec et sans PCM.

Travaux effectués et résultats acquis

1 Modèle numérique cuve/PCM

Durant l'année 2006, nous avons perfectionné le modèle numérique permettant de simuler des modules de matériaux à changement de phase. Ce modèle numérique, Type260, est basé sur le modèle standard TRNSYS pour cuve du Type60. Le rapport annuel 2005 décrit les principales fonctions de ce modèle cuve/PCM [9].

1.1 COEFFICIENT DE CONDUCTION EFFECTIF

Au cours de l'année 2005, nous avons constaté que le modèle numérique donnait des résultats très différents de ceux obtenus par mesures (voir Rapport 2005). Ce problème était lié au calcul du transfert de chaleur dans le PCM. En effet, dans un souci de simplicité de programmation, nous avions 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 mieux 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.

1.1.1 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.

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

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

λ = coefficient de conduction [W/(m.K)]

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

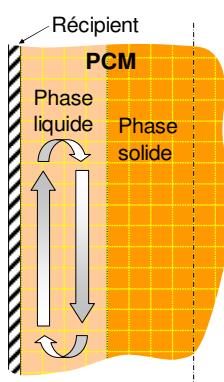


Figure 1 : Convection naturelle dans le PCM

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 valeur 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 (B) et (C) de [3] et [4]. Le calcul du nombre de Nusselt est donné par [3] pour les formes rectangulaires ou cylindriques et [4] pour les sphères :

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

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

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

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

- Rayleigh est défini par :

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

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

β = 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]

ν = viscosité cinématique [m^2/s]

a = diffusivité thermique [m^2/s]

La Figure 3 ci-dessous montre les résultats obtenus avec le modèle cuve/PCM 2006.

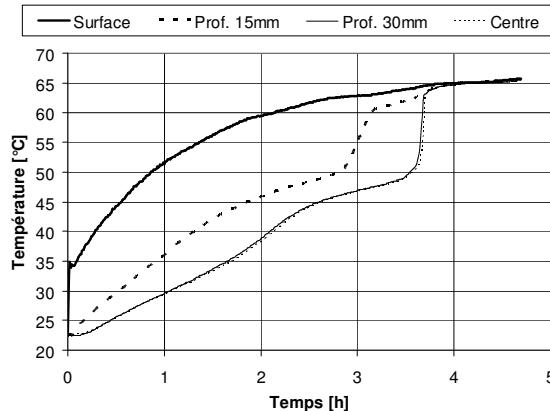


Figure 2 : Mesures en laboratoire.

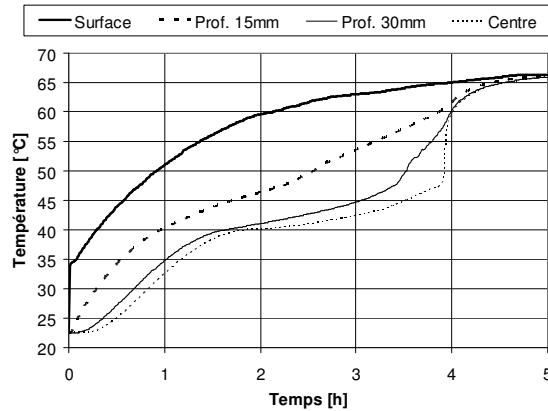


Figure 3 : Simulations avec calcul du coefficient de conduction effectif (modèle cuve/PCM 2006).

Les premières comparaisons entre les mesures et les simulations ont montré une amélioration nette 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 Tableaux 1 ci-dessous résume les valeurs choisies et les Figure 4 à Figure 9 illustrent les résultats de modélisation.

Paramètre	Valeur minimale	Valeur maximale	Valeur du four-nisseur pour la paraffine	Résultats en :
Viscosité cinétique $[10^6 \text{ m}^2/\text{s}]$	0.2 (eau à 100 [°C])	36 (Huile de transformateur à 20 [°C])	5	Figure 4 et Figure 5
Dilatation thermique en phase liquide $[1/\text{K}]$	0.0016 (éthère)	0.00018 (eau)	0.001	Figure 6 et Figure 7

Tableaux 1 : Valeurs minimales et maximales choisies pour les paramètres spécifiques liés au calcul de la convection naturelle dans le module de PCM.

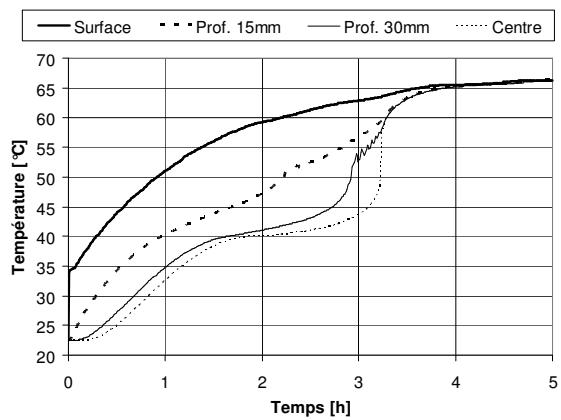


Figure 4 : Simulation avec une viscosité cinétique de $0.2 [10^6 \text{ m}^2/\text{s}]$.

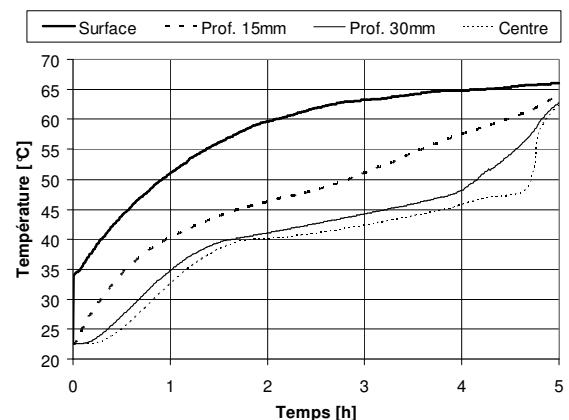


Figure 5 : Simulation avec une viscosité cinétique de $36 [10^6 \text{ m}^2/\text{s}]$.

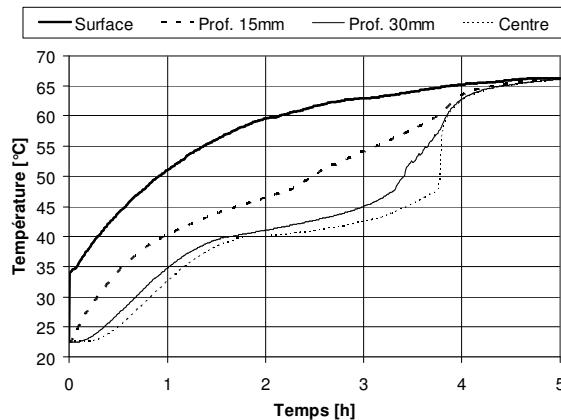


Figure 6 : Simulation avec une dilatation thermique en phase liquide $0.0016 [1/\text{K}]$.

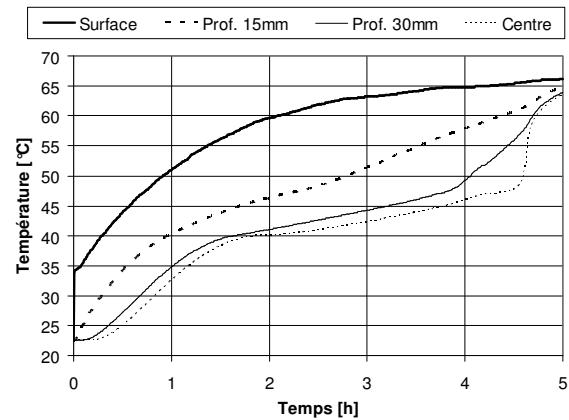


Figure 7 : Simulation avec une dilatation thermique en phase liquide $0.00018 [1/\text{K}]$.

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 8 et Figure 9 montrent les résultats obtenus avec le modèle cuve/PCM 2006.

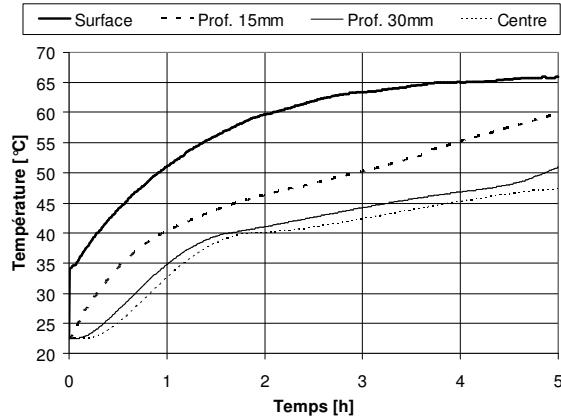


Figure 8 : Simulation en combinaison de la viscosité maximale et de la dilatation thermique minimale. La fin du changement de phase a lieu après 5 heures 30.

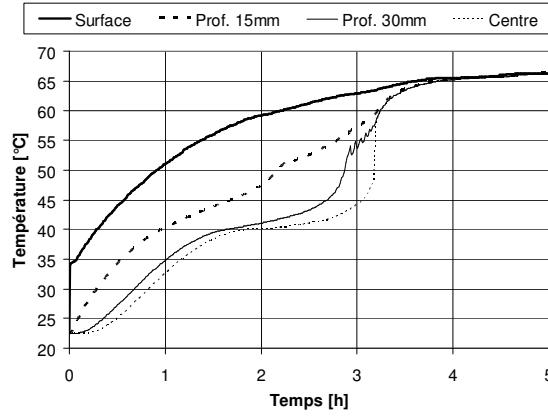


Figure 9 : Simulation en combinaison de la viscosité minimale et de la dilatation thermique maximale.

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 4 et Figure 6 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 2 ci-dessous récapitulent les différents avantages et inconvénients de chaque méthode de calcul utilisée jusqu'ici pour le transfert de chaleur dans le PCM.

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

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

METHODE 3 : calculs de la convection interne (modèle cuve/PCM 2006)Figure 3	
AVANTAGES	INCONVENIENTS
<ul style="list-style-type: none"> - Proche de la réalité. - 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. - Ne nécessite pas de mesures au préalable. - Influence réduite des paramètres tels que la viscosité cinématique ou la dilatation thermique. 	<ul style="list-style-type: none"> - Nécessite de connaître: la viscosité cinématique, la dilatation thermique.

Tableaux 2 : 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 soucis 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.

2 Comparaison avec des mesures réalisées par l'Université de GRAZ

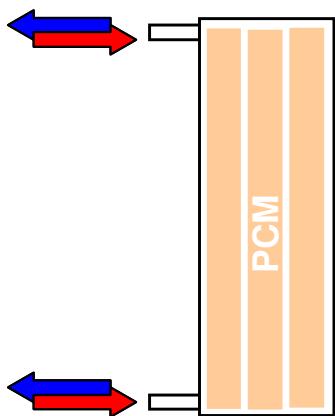


Figure 10 : Cuve de 35 litres avec 7 tubes contenant du PCM.

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 10). 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 d'un point de vue de la puissance délivrée lors de la charge thermique, comme le montre la Figure 11. 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 12). 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 13). Mais dans l'ensemble, le modèle numérique donne de bons résultats.

née 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 13). Mais dans l'ensemble, le modèle numérique donne de bons résultats.

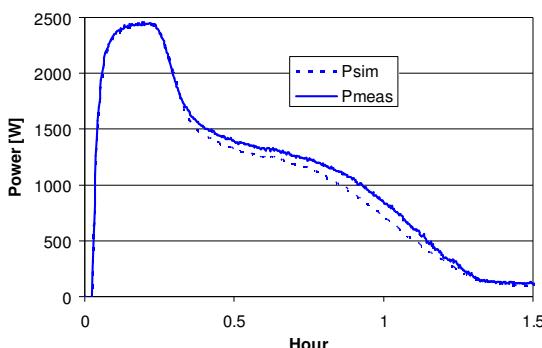


Figure 11 : Comparaison de la puissance de charge thermique mesures/simulation.

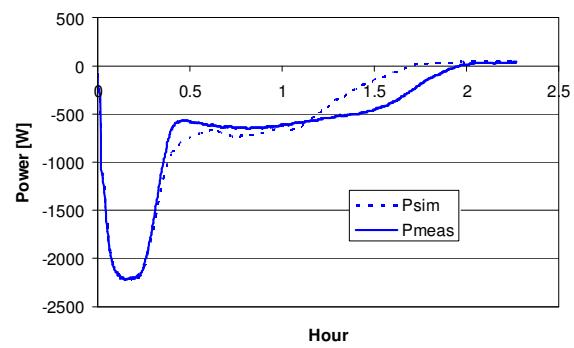


Figure 12 : Comparaison de la puissance de décharge thermique mesures/simulation.

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.

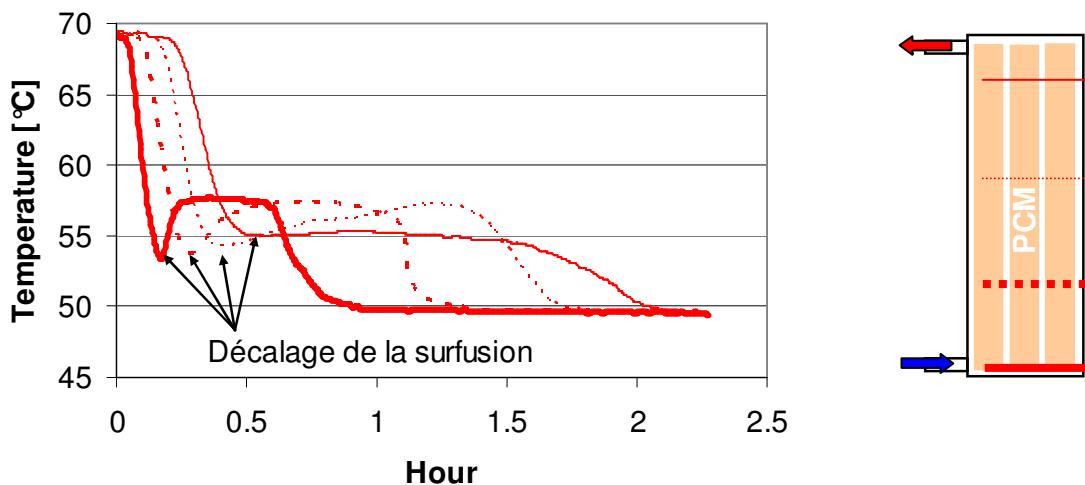


Figure 13 : Mesures de températures à différentes hauteurs dans le PCM lors de la décharge thermique où le phénomène de surfusion apparaît. Il y a surfusion dans le module alors qu'il y a déjà eu une première cristallisation à une extrémité (trait fort).

3 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 ΔP de 1 bar (Figure 14). 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 14 : 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. 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 15). 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.

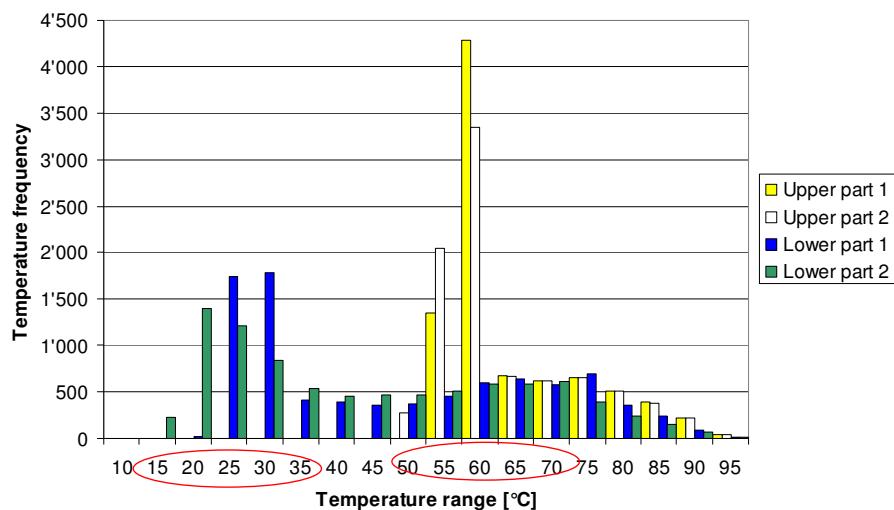


Figure 15 : Fréquence des températures dans la cuve selon la hauteur considérée.

Dans la partie basse de la cuve, les fréquences des 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 ajouter le plus possible de ce matériau. 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 16 et Figure 17). 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 16). 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.

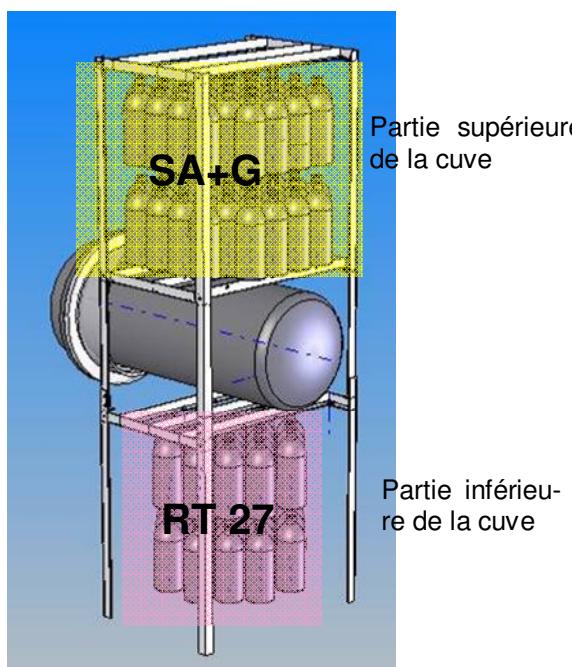


Figure 16 : Emplacement des bouteilles aluminium et leur structure porteuse.



Figure 17 : Système d'accrochage des bouteilles.

4 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 18 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.

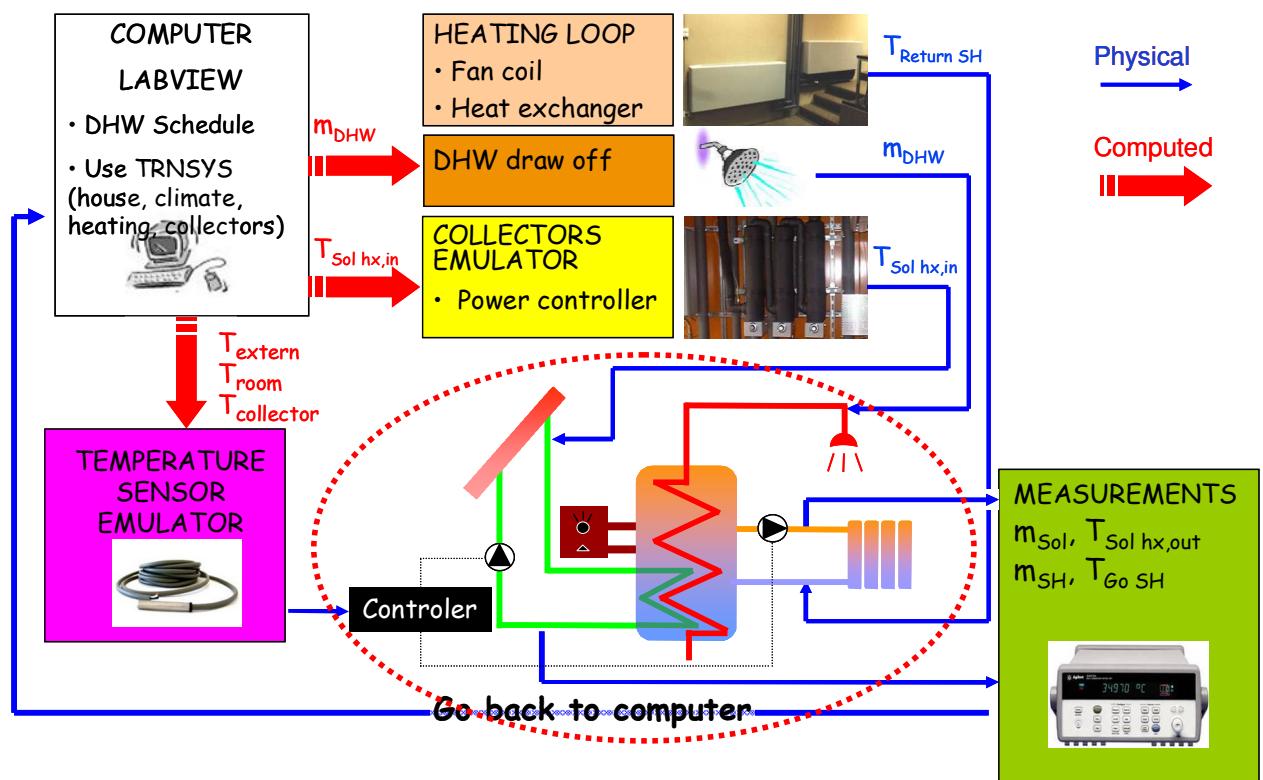


Figure 18 : Schéma de principe du cheminement et de l'utilisation des différentes variables physiques ou numériques du banc de tests Arpège.

4.1 CONDITIONS DES TESTS ECS+CHAUFFAGE

Deux types de tests sont prévus. Le premier est une succession de 7 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 19). Toutes deux proviennent du fichier météo de Zürich utilisé durant la tâche 26 de l'AIE. L'installation solaire est émulée avec 12 m² de capteurs pour une maison familiale d'un indice de dépense énergétique de 30 [kWh/(m².an)]. La surface de la maison est de 140 m². 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 20 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 ventilateurs 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.

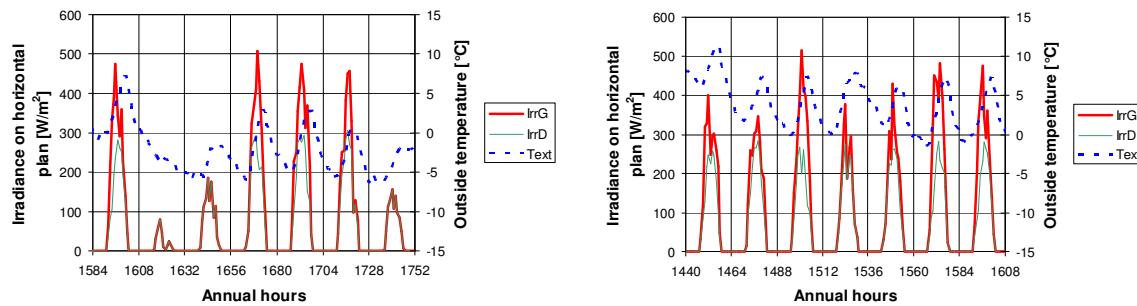


Figure 19 : Séquences météorologiques choisies : journées hivernales à Zürich, données Meteonorm (à gauche Météo 1, à droite Météo 2).

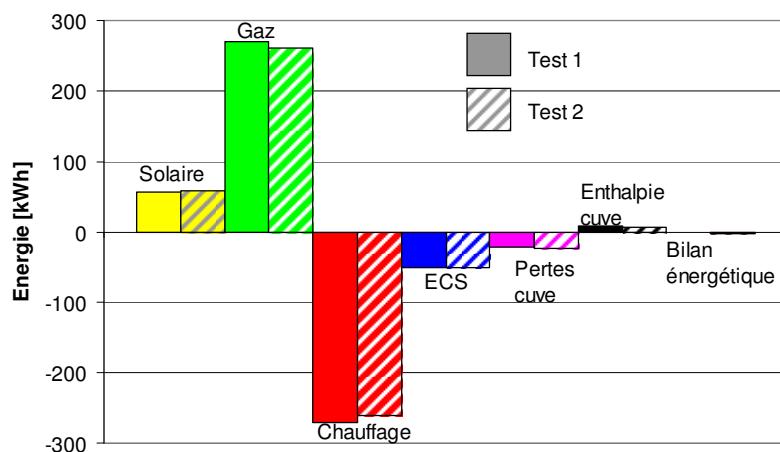


Figure 20 : Tests de reproductibilité (mesures sans PCM)

4.2 CONDITIONS DES TESTS ECS

Le deuxième type de test effectué est un soutirage d'ECS quotidien de 1000 litres durant deux jours selon le profil de la Figure 21. 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].

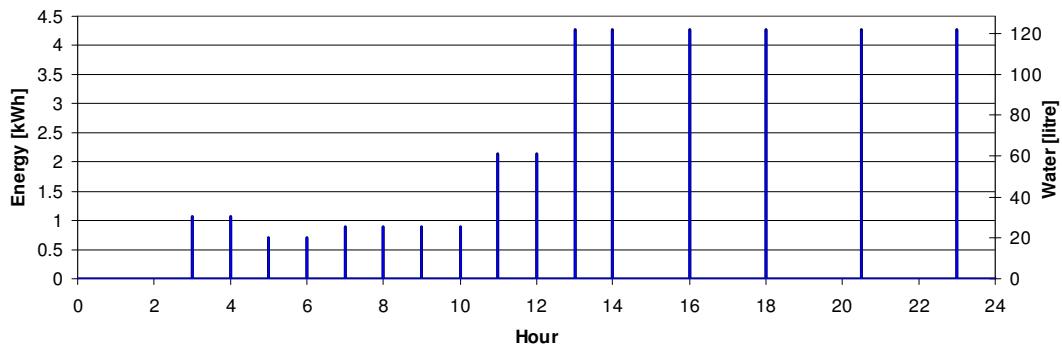


Figure 21 : Profil de soutirage d'ECS au cours d'une journée lors du test sanitaire : 1000 litres/jour.

4.3 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 22 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.

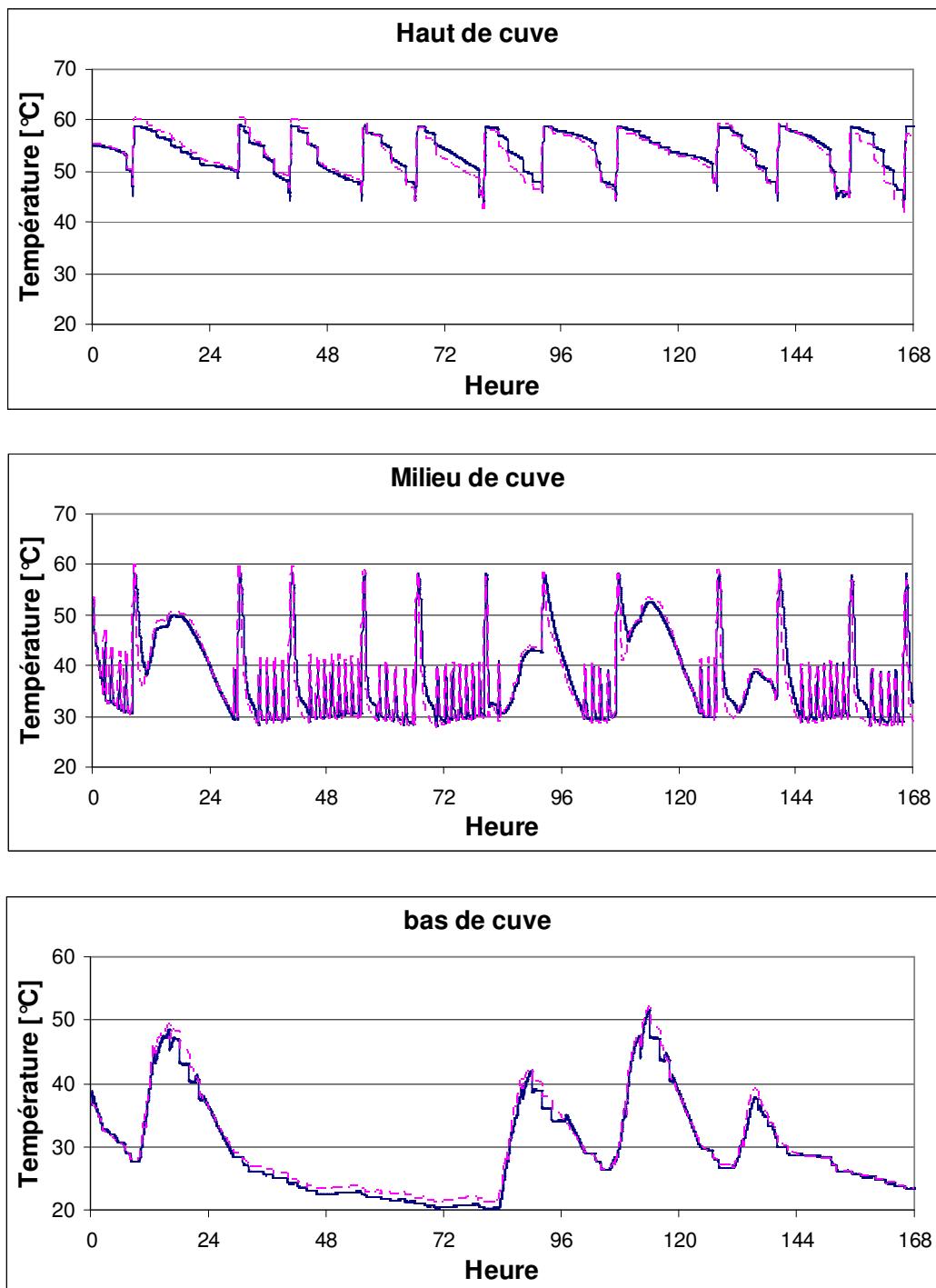


Figure 22 : Températures à différentes hauteurs dans la cuve sans PCM. Comparaisons entre les mesures (trait plein) et la simulation (pointillés). Durée de la comparaison : 7 jours (168 heures).

Nous avons fait de même avec la cuve remplie de PCM. Comme le montre les graphiques de la Figure 23, la comparaison est également bonne.

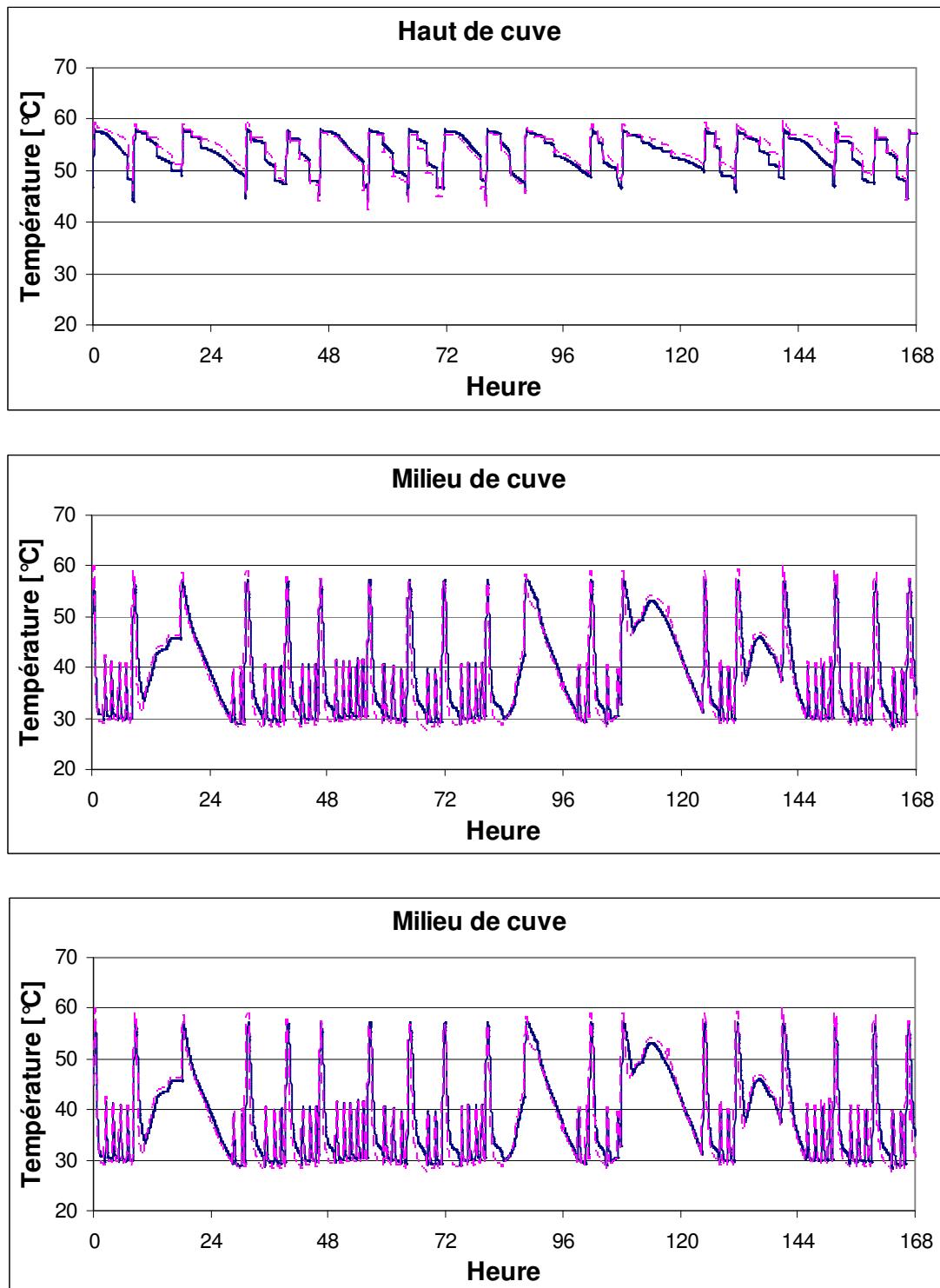


Figure 23 : Températures à différentes hauteurs dans la cuve avec PCM. Comparaisons entre les mesures (trait plein) et la simulation (pointillés). Durée de la comparaison : 7 jours (168 heures).

4.4 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 24). 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 24 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 25. Sur ce graphique, la consommation de gaz, un peu plus importante avec des PCM, est liée à une demande en chauffage également plus élevée.

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

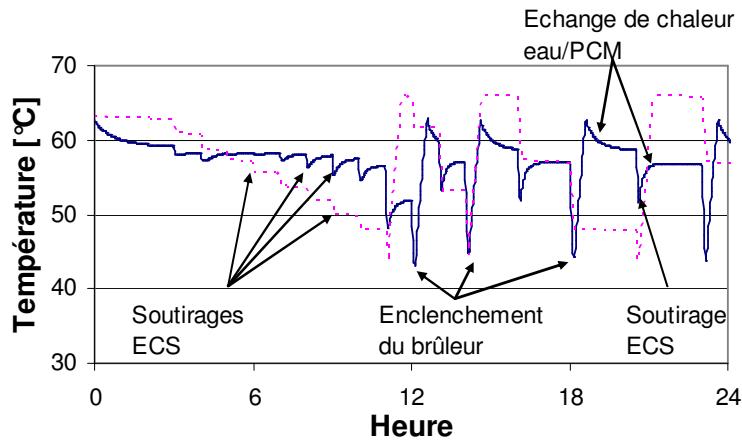


Figure 24 : Température dans le haut de la cuve (pointillés : sans PCM ; trait plein : avec PCM). Test de soutirage ECS

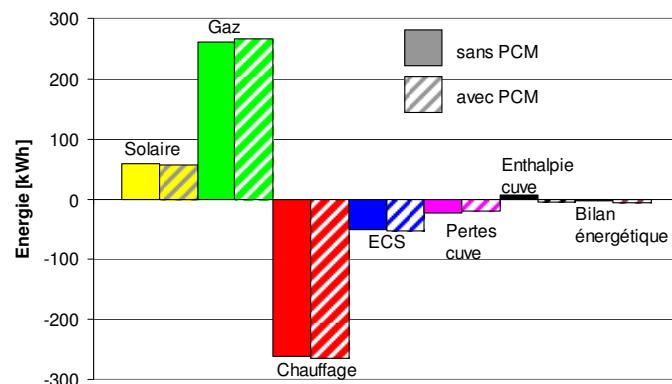


Figure 25 : Bilan énergétique sur 7 jours sans PCM (bâtons pleins) et avec PCM (bâtons hachurés).

5 Synthèses des simulations et comparaisons

Depuis l'année 2005, nous faisons des comparaisons entre des mesures expérimentales et des simulations avec notre modèle numérique cuve/PCM (Figure 26).

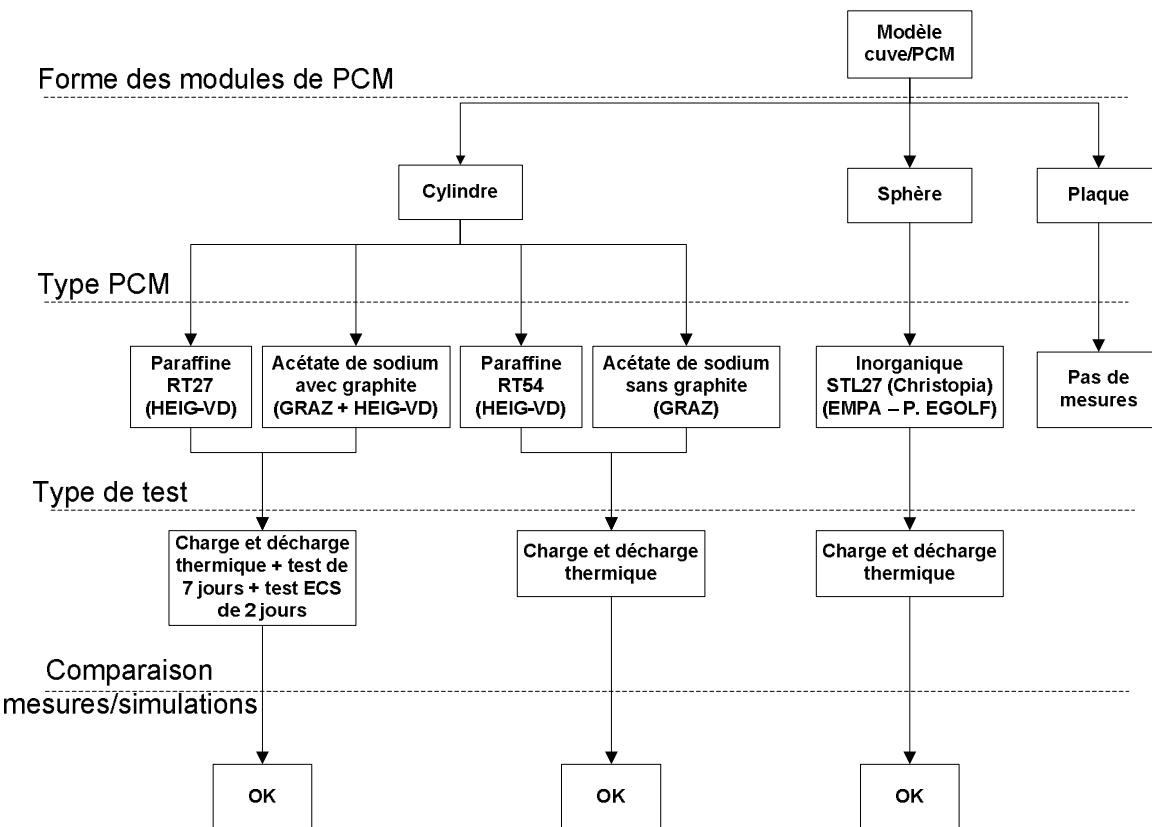


Figure 26 : Diagramme des comparaisons mesures/simulations effectuées avec le modèle Cuve/PCM

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 sur 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.

6 Simulations annuelles d'Arpège

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 m² 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 de profiter au maximum de l'expérience acquise à ce jour [6]. La demande en énergie de chauffage pour le bâtiment est de 4319 [kWh/an], soit 30 [kWh/(m².an)]. La demande en ECS est de 3040 [kWh/an], soit 8,28 [kWh/jour]. La Figure 27 présente les premiers résultats avec trois indicateurs : la fraction d'énergie épargnée ($F_{sav,therm}$), cette même fraction d'énergie épargnée diminuée d'un certain pourcentage en fonction de la non fourniture d'énergie (notion de pénalité $-F_{si}$) et le nombre de surchauffes solaires dans la cuve par an (surchauffe estivale). Plusieurs cas de figures ont été simulés. Le chiffre entre parenthèses, dans la légende de la Figure 27, représente le pourcentage de PCM en volume par rapport au volume total de la cuve.

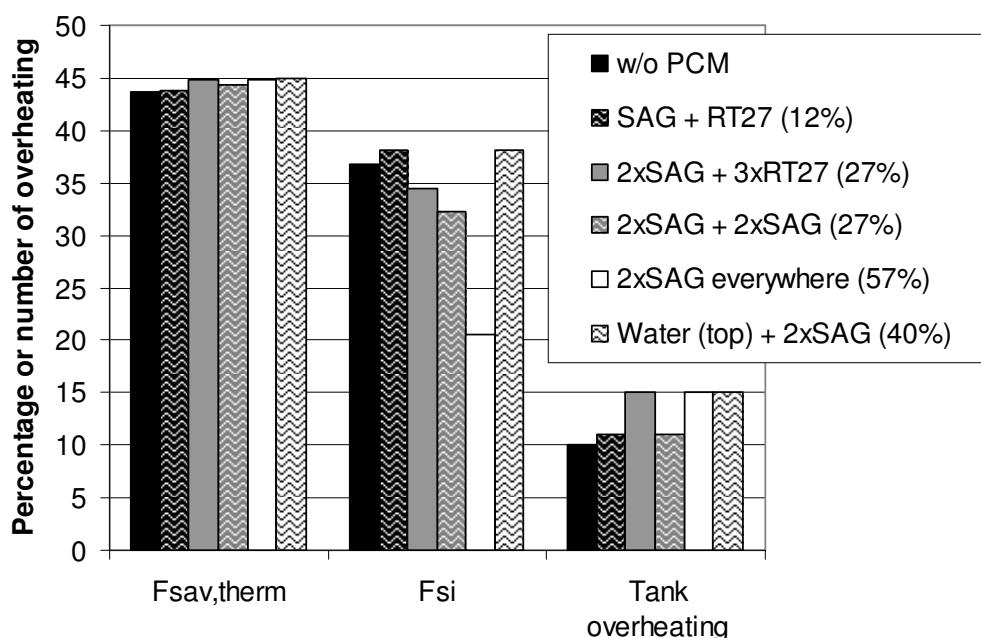


Figure 27 : Résultats de simulations annuelles pour l'installation solaire combinée Arpège avec différents types et pourcentages de PCM. Volume de la cuve : 824 litres.

- $F_{sav,therm}$: 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 F_{si} 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 3 donne le type et la quantité de PCM dans la cuve en fonction de la hauteur.

Légende Figure 27	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 21% en partie haute	Pas de PCM	Paraffine RT27 14% en partie basse	SAG+RT27 (valeurs utilisées dans les tests en laboratoire)
Gris	Acétate de sodium avec graphite 42% en partie haute	Pas de PCM	Paraffine RT27 42% en partie basse	2xSAG+3xRT27
Gris hachuré	Acétate de sodium avec graphite 42% en partie haute	Pas de PCM	Acétate de sodium avec graphite 42% en partie basse	2xSAG+2xSAG
Blanc	Acétate de sodium avec graphite 57% en partie haute	Acétate de sodium avec graphite 57% en partie médiane	Acétate de sodium avec graphite 57% en partie basse	2xSAG everywhere
Blanc hachuré	Pas de PCM	Acétate de sodium avec graphite 57% en partie médiane	Acétate de sodium avec graphite 57% en partie basse	Water (top) +2xSAG

Tableau 3 : Explication des différentes couleurs des barres de la Figure 27.

7 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 28 utilise les mêmes indicateurs que la Figure 27 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.

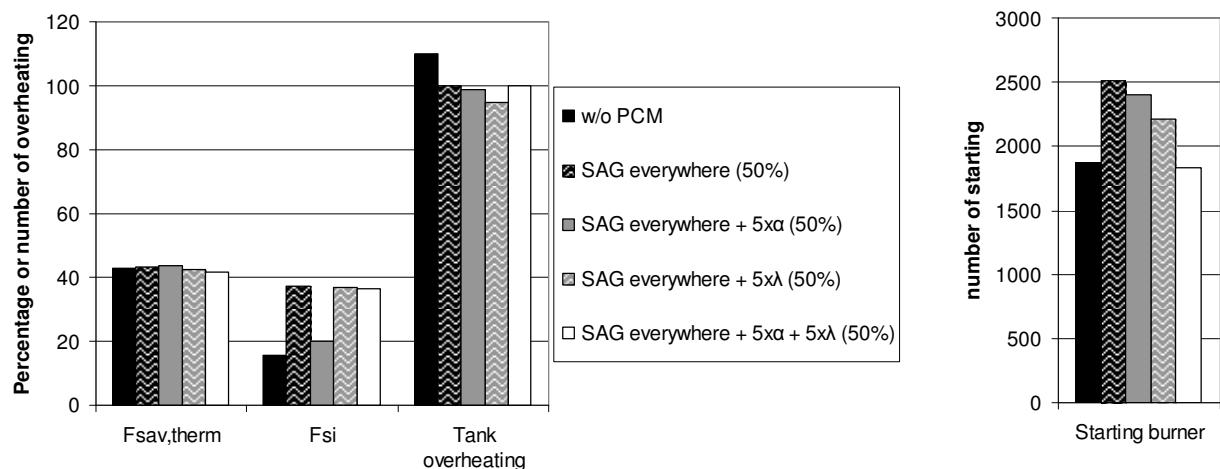


Figure 28 : Résultats de simulations annuelles pour l'installation solaire combinée Arpège avec différents transferts de chaleur. Volume de la cuve : 400 litres.

- **Fsav,therm :** L'augmentation de la fraction d'énergie épargnée est faible voire nulle en utilisant le PCM dans cette configuration.
- **Fsi :** Le critère de non fourniture d'énergie (Fsi) est très sensible du 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 Fsi 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 27). 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 28) 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 4.4 et Figure 24. 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 4 donne les différents cas de figure simulés pour le transfert de chaleur.

Légende Figure 28	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 α
Gris hachuré	Conforme aux calculs théoriques	5 fois supérieur aux calculs théoriques	SAG everywhere +5x λ
Blanc	5 fois supérieur aux calculs théoriques	5 fois supérieur aux calculs théoriques	SAG everywhere +5x α + 5x λ

Tableau 4 : Explication des différentes couleurs des barres de la Figure 28.

8 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 quelle est 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.

8.1 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 inclus 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.

8.2 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 (CO₂, N₂O, CH₄, H₂, ...) en tenant compte de leur contribution relative. Comme la référence est le CO₂, les valeurs d'impacts sont exprimées en [kg CO₂-eq].

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

8.2.1 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 29 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 5 donne pour chaque élément, le matériau et le poids des constituants.

Catégorie	Matériaux	Poids [kg]
Storage (830 l)		
Tank	Steel	223.73
Water	Water	830.00
Tube	Steel	10.91
Insulation	Urea	4.83
Auxiliary (oil/gas)		
Burner	Mainly alu.	10.00
Combustion chamber	Stainless steel	65.81
Door	Steel	6.75
Insulation	Rockwool	0.44
Flue	PVDF	10.35
Heating loop		
Expansion bottle	Steel	16.00
SH pumps+valve	Copper alloy	12.00
DHW loop		
DHW HX	Stainless steel	22.75
Collector loop		
Expansion bottle	Steel	28.00
Solar pump+tube	Copper aloy	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
Collector 12m²		
Glass		100.50
Absorber	Stainless steel	115.66
Insulation	Glass fiber	54.25
Rubber	Rubber	15.00
Frame	Aluminium	65.70
Other		
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
PCM (300 kilos)		
	Parrafine	300.0
	Bottle	27.0
	Caps	3.0

Tableau 5 : Liste des constituants du combi-système Arpège avec PCM.

8.2.2 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

8.3 RÉSULTATS

La Figure 30 donne la proportion des impacts par matériaux du système Arpège avec PCM et les bouteilles en aluminium.

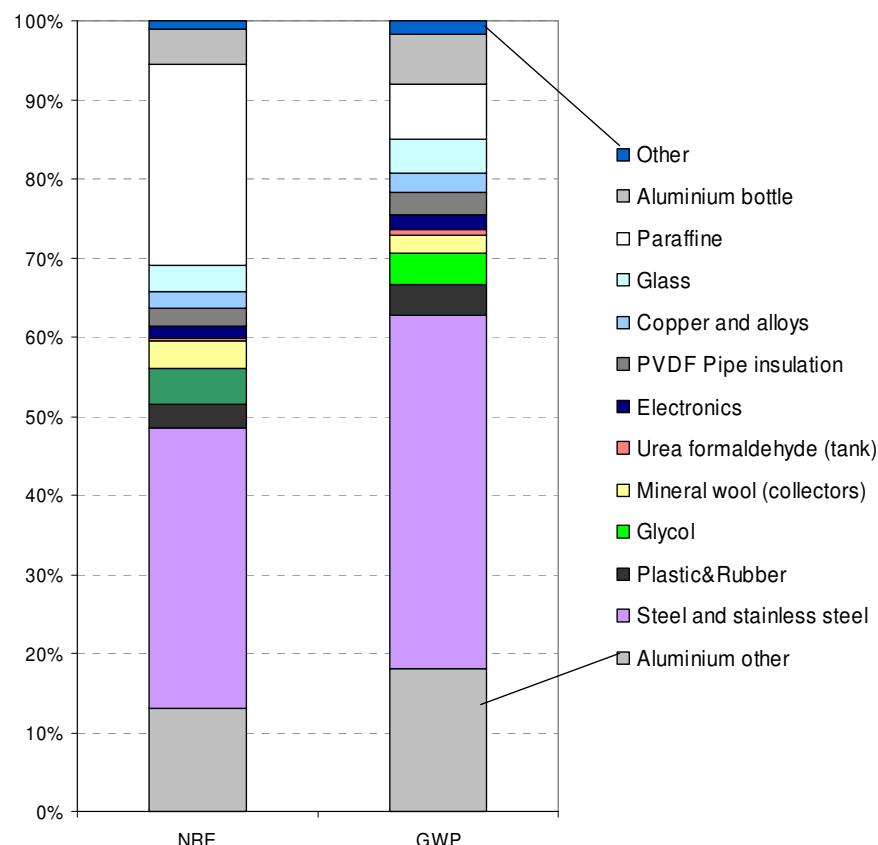


Figure 30 Proportion des impacts des différents matériaux composants le combi-système Arpège avec PCM.

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

Indicateur	PCM (paraffine) [% du total]	Récipient (aluminium) [% du total]	PCM + Récipient [% du total]
NRE	25.4	4.5	29.8
GWP	7.1	6.2	13.2

Les impacts environnementaux du PCM et du récipient semblent importants quant ils sont comparés aux impacts des autres matériaux constituants Arpège. Toutefois, il ne faut pas oublier que durant le cycle de vie du combi-système, de l'énergie d'appoint est consommée, ce qui va également générer des impacts dont il faut tenir compte.

8.3.1 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 31.

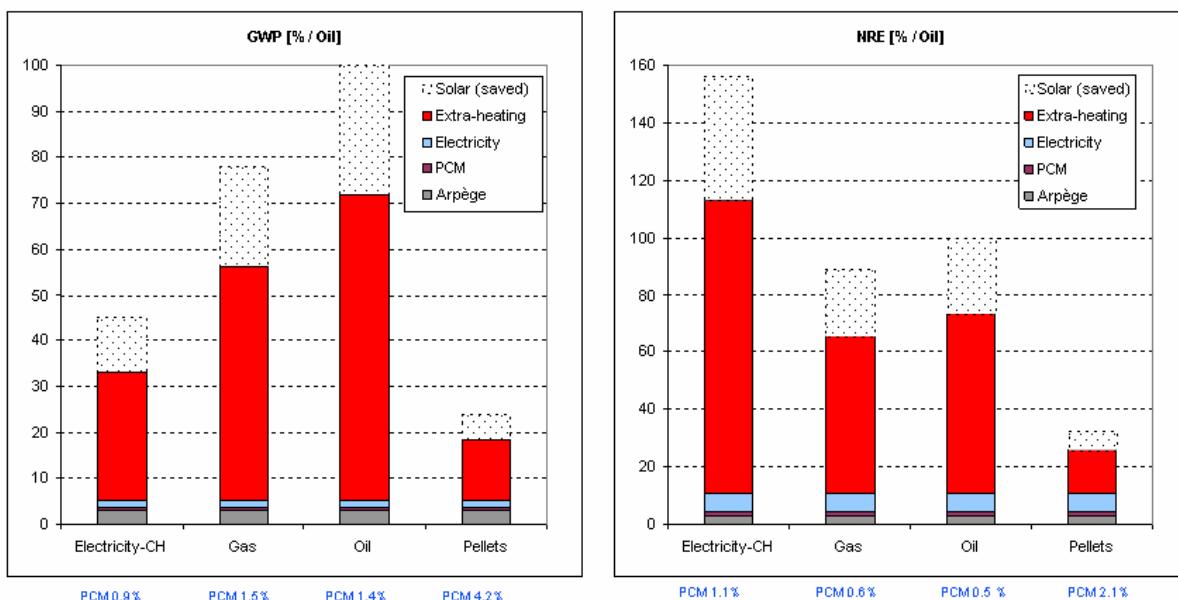


Figure 31 Proportion des impacts GWP et NRE pour différentes énergies d'appoint. Les résultats sont exprimés en prenant une valeur de 100% pour la variante avec énergie d'appoint au mazout sans le solaire. Les valeurs PCM X%, indiquent la part des impacts du PCM par rapport à l'ensemble des impacts (sans le solaire).

Dans la Figure 31, 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 31, 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 31 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 comptabilisé 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 la 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 [1]:

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

Par conséquence, 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.

9 Conclusion et perspectives

Les tests effectués avec Arpège avaient pour but initial de valider le modèle numérique pour une installation faisant intervenir un comportement plus complexe que ceux étudiés jusque-là et fonctionnant sur une durée de plusieurs jours. Comme remarqué lors des mesures de 7 jours en laboratoire, les résultats des simulations annuelles montrent qu'il est difficile d'améliorer les performances de l'installation solaire Arpège en y introduisant des modules de PCM. Même si cette installation a permis de valider le modèle numérique, la conception d'une installation solaire conventionnelle est réalisée sans tenir compte du comportement des PCM.

Le groupe de l'Université de Graz a montré qu'il y avait un intérêt à employer les PCM dans un stock tampon afin de réduire le nombre d'enclenchements d'un brûleur. Cette étude est basée sur des résultats de simulations. 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 opposés montrent l'importance du rapport entre la rapidité de stockage thermique et l'échange de chaleur entre l'eau et le matériau à changement de phase. Nous aimerais donc analyser plus en détail le lien entre la puissance à stocker et le transfert de chaleur eau-PCM permettant de profiter des avantages des PCM. Afin d'effectuer cette analyse de sensibilité, nous proposons d'entreprendre une série d'expériences sur la base de chauffe-eau solaires avec un appoint électrique ce qui présentera l'avantage d'avoir une plage de température d'utilisation plus réduite et une puissance modulable.

Ces résultats expérimentaux ainsi que des simulations complémentaires devraient permettre de trouver un ou des systèmes pour lesquels les PCM ont un potentiel d'utilisation et éventuellement permettre de trouver une installation "idéale".

10 Divers

Durant l'année 2006, nous avons présenté un article lors de la conférence internationale ECOSTOCK06 qui s'est tenue à Stockton aux Etats Unis. Cet article faisait référence au modèle numérique intégrant le coefficient de conduction effectif présenté dans ce rapport.

Un autre article est en cours de parution dans la revue "Energy & Buildings". Il présente le modèle numérique cuve/PCM dans son ensemble (hystérésis, surfusion, coefficient de conduction effectif).

11 Références

- [1] TRNSYS reference manual
- [2] J.Bony et al., *Three different approaches to simulate PCM bulk elements in solar storage tank*, PCM2005, Yverdon-les-Bains, juin 2005.
- [3] Franck P. Incropera, David P. De Witt, *Fundamentals of heat and mass transfer*, 1990. page 561.
- [4] Yunus A. Cengel, *Heat Transfer: A Practical Approach*, 1997, International Edition (ISBN : 0-07-115223-7).
- [5] Documentation Rubitherm, Allemagne (paraffine)
- [6] Werner Weiss and al. (2003), *Design handbook for solar combisystems*, James & James, London.
- [7] METEONORM
- [8] Peter Egolf, *Project Latentwärmespeicher für die Sonnenenergienutzung: Lade- und Entladevorgänge*, 1997
- [9] S. Citherlet, J. Bony, *Rapport annuel CoSyPCM*, OFEN, 2005
- [10] 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.