

Performances d'un système frigorifique domestique avec stockage par chaleur latente

Kamel AZZOUZ^{1*}, Denis LEDUCQ¹, Jacques GUILPART¹, Dominique GOBIN²

¹CEMAGREF – Unité de Recherche Génie des Procédés Frigorifiques, BP 44 – 92163 Antony Cedex

²CNRS-Laboratoire FAST, Bat 502-Campus Universitaire 91405 – Orsay -France

* (auteur correspondant : kamel.azzouz@cemagref.fr)

Résumé - Un prototype de réfrigérateur à haute inertie thermique utilisant un matériau à changement de phase a été réalisé. Des essais ont été effectués pour plusieurs charges thermiques à différentes températures ambiantes. Les données montrent une nette réduction des fluctuations de température dans l'enceinte réfrigérée et une amélioration du comportement du système en termes d'autonomie et d'efficacité énergétique. L'impact de l'inertie thermique sur le système frigorifique est présenté à partir de ses paramètres de fonctionnement (température d'évaporation et de condensation, consommation du compresseur, autonomie, temps de fonctionnement).

Nomenclature

<i>BP</i>	pression d'évaporation, <i>bar</i>	<i>Indices et exposants</i>
<i>COP</i>	coefficient de performance, -	<i>air</i> <i>air</i>
<i>K</i>	coefficient d'échange global, $Wm^{-2}.K^{-1}$	<i>comp</i> <i>compresseur</i>
<i>S</i>	surface d'échange, m^2	<i>ext</i> <i>extérieure</i>
<i>T</i>	température, <i>K</i>	<i>frig</i> <i>frigorifique</i>
<i>Symboles grecs</i>		<i>r</i> <i>résistance</i>
ϕ	puissance, <i>W</i>	
ρ	masse volumique, $kg.m^{-3}$	

1. Introduction

Différents travaux de recherche menés ces dernières années ont clairement montré que la conservation domestique des aliments posait des problèmes cruciaux, aussi bien en ce qui concerne le niveau des températures observées dans les réfrigérateurs [1] que les performances énergétiques de ces équipements [2]. Il apparaît donc que la recherche de solutions aux problèmes posés par cet équipement réponde particulièrement bien à un double besoin, visant d'une part la sécurité alimentaire et d'autre part la réduction de la consommation d'électricité domestique. L'intégration de matériaux à changement de phase (PCM) dans les réfrigérateurs domestiques est une solution technologique innovante et économique qui permet d'apporter une réponse à ces deux problèmes.

L'effet d'une plus grande inertie thermique due à l'utilisation de ces matériaux a pour conséquence de limiter le nombre d'arrêts-démarrages (chaque démarrage étant caractérisé par une surconsommation électrique [3]), de privilégier certaines heures de fonctionnement dans la journée et de stabiliser la température pour une meilleure conservation des aliments.

Afin de quantifier l'impact énergétique lié à l'ajout du PCM, de poser des critères de choix du matériau de stockage et de son conditionnement, le réfrigérateur et le PCM ont été instrumentés et des mesures en régime dynamique ont été effectuées.

2. Description du dispositif expérimental

Le réfrigérateur de base qui a servi à la conception du prototype est un réfrigérateur à une porte sans compartiment froid, de la marque BOSCH: (KS 30 R 425). L'isolant qui recouvre la paroi arrière de l'évaporateur a été retiré pour permettre d'insérer et de fixer sur l'évaporateur à l'aide d'une colle silicone le conteneur en Plexiglas® du PCM. Le matériau à changement de phase est ainsi en contact direct avec l'évaporateur (Figure 1 et 2). Pour une meilleure rigidité de l'ensemble, le conteneur est constitué de 6 compartiments distincts de dimension : 300 x 200 x 5 mm.

La régulation d'origine du réfrigérateur a été remplacée par un régulateur TOR, de manière à contrôler complètement le mode de régulation du réfrigérateur.

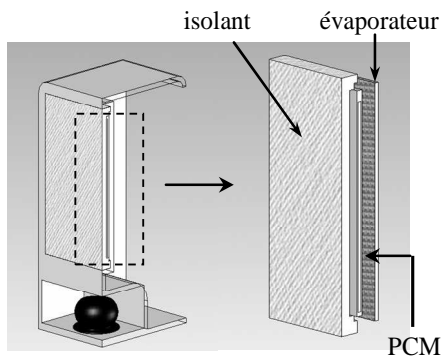


Figure 1: Représentation schématique du réfrigérateur avec PCM



Figure 2: Vue de l'évaporateur avec les compartiments de PCM

Afin de caractériser le fonctionnement du prototype, l'ensemble réfrigérateur et PCM ont été instrumentés. Des thermocouples de type T (cuivre / constantan) préalablement étalonnés (précision: $\pm 0,25$ °C) ont été installés à l'entrée et à la sortie des éléments constituant le prototype. L'élément de stockage a été équipé de 15 thermocouples placés à différentes positions afin de dresser une cartographie thermique de l'ensemble du PCM. L'instrumentation de l'évaporateur et du condenseur a été réalisée de manière à permettre le suivi de l'état du frigorigène en plusieurs points du circuit. Comme il nous était difficile de placer les thermocouples en contact direct avec le fluide frigorigène (diamètre hydraulique assez faible), nous avons évalué les températures du fluide frigorigène par contact du thermocouple avec le tube du circuit en prenant soin d'isoler thermiquement le tout vis-à-vis de l'ambiance. La température de l'air dans l'enceinte frigorifique a été mesurée à plusieurs hauteurs à l'aide de thermocouples installés sur un support. Deux capteurs de pression (de précision 0,01 bar) placés à l'aspiration et au refoulement du compresseur permettent de déterminer la pression d'évaporation et de condensation. Un wattmètre numérique (de précision ± 1 W), affichant simultanément la tension, le courant et la puissance permet de mesurer la puissance électrique consommée par le compresseur.

3. Essais et résultats

Les essais du prototype utilisant une épaisseur de 5 mm d'eau comme PCM, ont été effectués pour plusieurs températures extérieures (de 15 à 30°C) et pour différentes charges thermiques (chauffage intérieur entre 9 et 29W). L'ensemble de ces essais ont été réalisés dans une cellule à hygrométrie et température contrôlées (régulée à $\pm 0,2$ °C).

3.1. Caractérisation thermique du réfrigérateur avec PCM

La qualité de l'isolation d'une enceinte réfrigérée est caractérisée par son coefficient global de transmission de chaleur K , qui définit la puissance thermique échangée en régime permanent par unité de surface moyenne géométrique de paroi, sous un écart de température de 1 K entre l'intérieur et l'extérieur de l'enceinte. La mesure du coefficient K du réfrigérateur avec PCM est réalisée dans une cellule à température contrôlée. Une résistance chauffante fournissant une puissance de chauffage constante est placée à l'intérieur de l'enceinte réfrigérée ; à l'aide d'un rhéostat, on règle la puissance émise dans l'enceinte du réfrigérateur. Connaissant la puissance fournie à l'intérieur de l'enceinte du réfrigérateur à l'aide d'un wattmètre, on sait que les seules pertes sont celles dues à travers les parois.

En régime permanent on a :

$$\phi_r = \phi_d = K \cdot S_{moy} \cdot (T_{air} - T_{ext}) \quad (1)$$

où ϕ_r est la puissance fournie par la résistance thermique (en W), mesurée par un wattmètre,

et ϕ_d est la puissance de déperditions thermiques par les parois (en W).

Ainsi les pertes globales du réfrigérateur avec PCM, caractérisées par K , sont de l'ordre de **0,42 W/m²K**, résultat quasi identique à celle sans PCM (K sans PCM : 0,415 W/m²K [4]).

3.2. Mesure du Coefficient de performance du réfrigérateur (COP)

La méthode de mesure du COP consiste à introduire une résistance chauffante dans l'enceinte du réfrigérateur en marche pour simuler une charge thermique (aliments, ouvertures de porte). Sur un cycle de fonctionnement, le coefficient de performance moyen est défini comme étant le rapport entre la puissance frigorifique (demande de froid) et la puissance électrique consommée par le compresseur. À partir de la température moyenne de l'air dans l'enceinte (T_{air}), la température dans la cellule d'essai (T_{ext}), la puissance de chauffe (ϕ_r) et la consommation du compresseur, on peut calculer le COP avec la formule suivante:

$$COP = \frac{\phi_{frig}}{\phi_{comp}} = \frac{K \cdot (T_{ext} - T_{air}) + \phi_r}{\phi_{comp}} \quad (2)$$

4. Discussion

Les essais d'abord effectués en utilisant l'eau comme matériau à changement de phase (matériau présentant l'avantage d'une stabilité dans le temps et une très bonne chaleur latente de changement de phase), ont permis de mettre en évidence l'existence de trois modes de fonctionnement :

- fonctionnement avec le PCM partiellement fondu, cas correspondant à des charges thermiques élevées (résistance de chauffe > 19 W).
- fonctionnement avec le PCM partiellement solidifié, cas correspondant à des charges thermiques faibles (température d'ambiance < 15°C).
- fonctionnement avec le PCM complètement solidifié puis complètement fondu.

Une température extérieure élevée (ou une charge thermique élevée) a en effet pour conséquence une remontée rapide de la température intérieure et un démarrage du moteur, ce qui ne permet pas une fonte complète du PCM (fusion partielle) (Figure 3). Au contraire une charge thermique faible ne permet pas de faire fonctionner le compresseur suffisamment longtemps pour intégralement congeler le PCM (Figure 4). Il existe par contre un domaine de fonctionnement assez large où le PCM fond et congèle complètement.

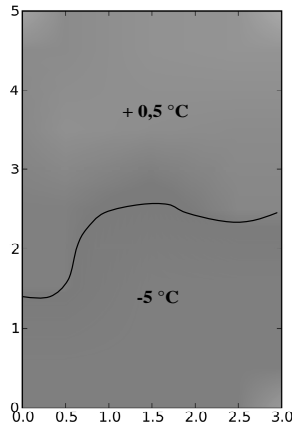


Figure 3 : Répartition des températures dans le PCM au démarrage du compresseur (cas d'une fusion partielle: $T_{ext}=15^{\circ}\text{C}$, $\phi_R=0\text{W}$)

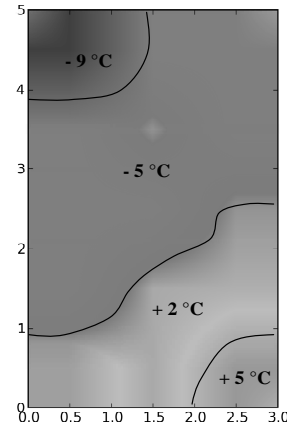


Figure 4: Répartition des températures dans le PCM à l'arrêt du compresseur (cas d'une solidification partielle: $T_{ext}=20^{\circ}\text{C}$, $\phi_R=29\text{W}$)

Ces différents comportements du système montrent l'importance de la charge thermique (température d'ambiance et puissance de chauffe) dans le choix de la température de changement de phase du PCM, sachant qu'à l'arrêt du système, la température de l'évaporateur est voisine de la température de changement de phase du PCM.

L'évolution de la température de l'air dans l'enceinte du réfrigérateur avec eau comme PCM donnée dans la Figure 5, montre que l'ajout d'une plaque de PCM de 5 mm dans la face arrière de l'évaporateur permet de réduire significativement les fluctuations de température dans l'enceinte du réfrigérateur tout en diminuant le temps de fonctionnement du compresseur (17,5 % avec PCM contre 25 % sans PCM). Ainsi pour 2,8 litres d'eau, correspondant à une capacité de stockage de 924 kJ et un réglage de la consigne du thermostat pour une température d'air de 5°C, il est possible d'avoir une autonomie (maintien du groupe froid à l'arrêt) de 8 heures et demie.

Pour cet essai, l'amélioration énergétique due à l'ajout du stockage par chaleur latente est de l'ordre de 25% (Tableau 1). Elle est sensiblement identique pour tous les essais lorsque l'on a fusion et solidification totales. Cette amélioration du coefficient de performance est due à une remontée de la pression d'évaporation de l'ordre de 0,2 bar (Figure 6), ce qui correspond à un gain d'environ 6°C en température d'évaporation. Cette remontée de la température d'évaporation a aussi pour conséquence une puissance frigorifique plus élevée lorsque le compresseur est en fonctionnement.

Lorsque la température d'évaporation augmente, la masse volumique du frigorigène à l'aspiration de l'évaporateur augmente ($\rho_{sans-pcm} = 2,22 \text{ kg/m}^3$, $\rho_{avec-pcm} = 2,76 \text{ kg/m}^3$), le débit massique aspiré par le compresseur augmente donc (le débit volumétrique restant le

même). Cette augmentation du débit massique explique l'augmentation de la puissance frigorifique.

	Durée Cycle	T air moyen	Demande Moyenne	ϕ_{COMP}	COP	Amélioration COP	Autonomie	% Fonct	BP
	[mn]	[°C]	[W]	[W]	-	%	[h]	%	[bar]
sans PCM	132	5,7	23	14,99	1,67		1,58	28	0,78
avec eau 5 mm	617	5,9	21,8	10,46	2,08	125 %	8,48	17,5	0,98

Tableau 1 : Performances du réfrigérateur avec et sans PCM

Des essais préliminaires ont été effectués avec un PCM stabilisé (gel polymère + eau) solidifiant à -3°C. Le comportement est proche de celui observé avec l'eau, l'autonomie étant légèrement inférieure (6,8 h avec ce PCM contre 8,5 heures avec de l'eau) du fait de sa plus faible chaleur latente (Figure 7).

5. Conclusion

L'étude expérimentale présentée ici concerne la caractérisation des différents paramètres de fonctionnement et l'efficacité énergétique d'un système frigorifique à haute inertie thermique avec matériau à changement de phase. Un prototype de réfrigérateur avec PCM a été conçu et testé pour différentes charges thermiques. Les résultats obtenus avec PCM montrent clairement l'intérêt de l'intégration d'un tel élément dans un réfrigérateur domestique. L'autonomie du réfrigérateur peut atteindre plus de 8h avec une température ambiante de 20°C. Le coefficient de performance est en moyenne plus élevé de 20 à 25%, lorsque les conditions de fonctionnement sont telles que le matériau congèle puis fond intégralement.

Les résultats ont aussi mis en évidence la non-uniformité de température de paroi de l'évaporateur, étant donné l'importance de la surchauffe en sortie évaporateur. Celle-ci est due au phénomène de remplissage progressif de l'évaporateur en frigorigène lors du démarrage.

Références

- [1] O. Laguerre : Study of domestic refrigeration temperature and analysis of factors affecting temperature, *International Journal of Refrigeration*. Vol 25. 2002.
- [2] ADEME : Etude expérimentale des appareils électroménagers à haute efficacité énergétique placés en situation réelle. Rapport final Projet ECODROME (1998).
- [3] J. Serrano : Numerical and experimental validation of hermetic reciprocating compressors. Integrating in vapour compression refrigerating systems . PHD thesis, Technical University of Catalonia (2002).
- [4] K. Azzouz, D. Leducq, J. Guilpart, D. Gobin : Improving the energy efficiency of a vapor compression system using a phase change material, *Second Conference on Phase Change Material & Slurry* , Switzerland 2005.

Remerciements

Ces travaux ont été réalisés avec le soutien financier de l'ADEME (Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie) et de l'ANR (Agence Nationale de la Recherche) dans le cadre du projet SIMPFRI avec la collaboration de la société CRISTOPIA et de la société BSH.

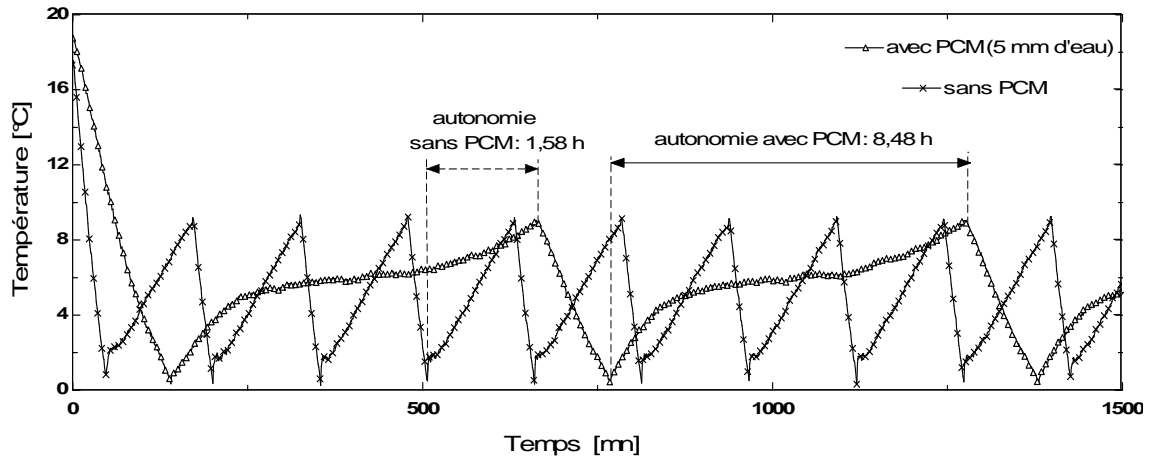


Figure 5 : Comparaison de l'évolution de la température de l'air sans PCM et avec PCM (Épaisseur PCM=5 mm $T_{ext}=20^{\circ}\text{C}$, $\phi_r=0\text{W}$)

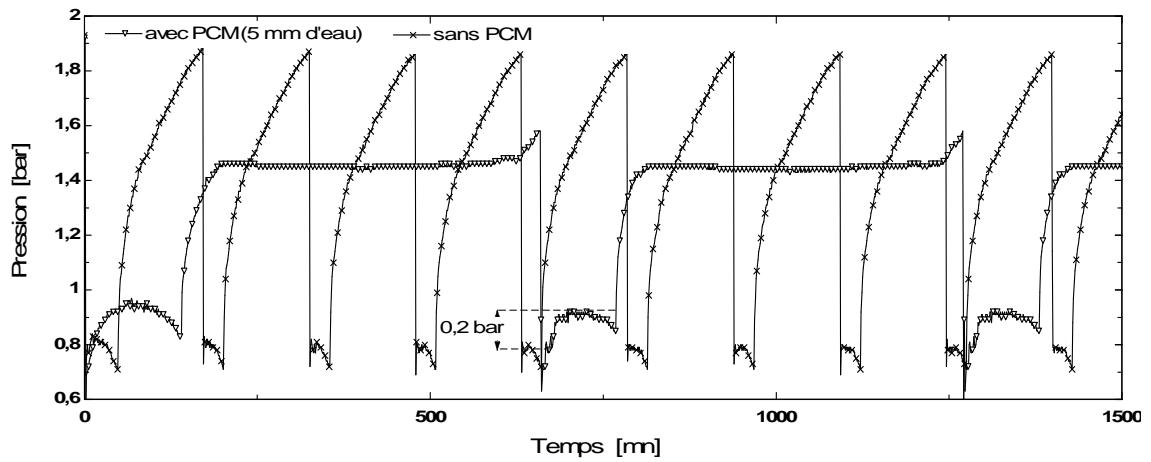


Figure 6 : Evolution de la pression d'évaporation avec et sans PCM (Épaisseur PCM=5 mm $T_{ext}=20^{\circ}\text{C}$, $\phi_r=0\text{W}$)

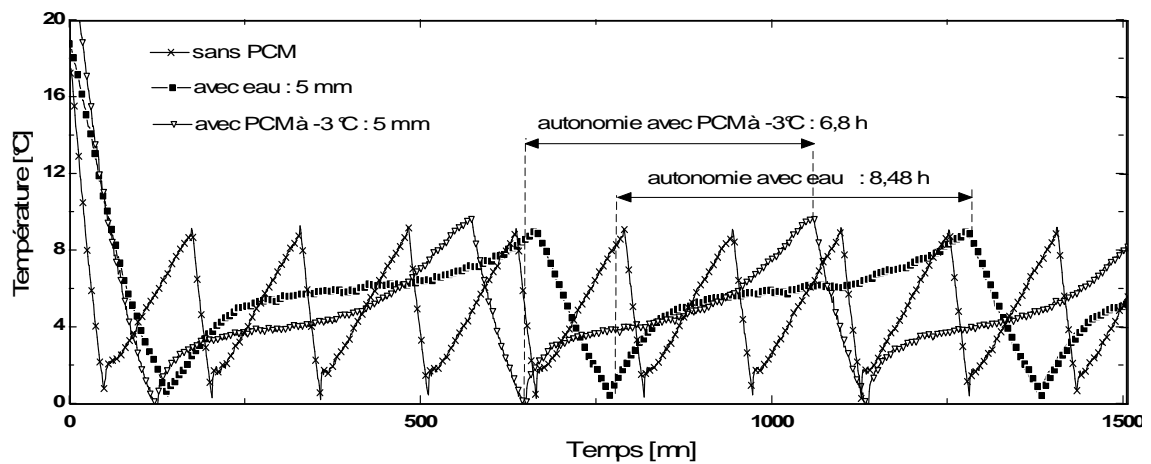


Figure 7 : Evolution de la température de l'air sans PCM, avec EAU et avec PCM à -3°C (Épaisseur PCM=5 mm $T_{ext}=20^{\circ}\text{C}$, $\phi_r=0\text{W}$)