

Étude numérique de l'intégration de matériaux à changement de phase dans les parois des chambres froides pour le stockage des produits alimentaires

Zakaria OUAOUJA ^{1,2}, Cyril TOUBLANC ¹, Abdellah OUSEGUI ², Olivier ROUAUD ¹, Michel HAVET ^{1*}

¹ Oniris, Nantes Université, CNRS, GEPEA, UMR 6144, F-44000, Nantes, France

² CSC, LMIMP, ENSAM, Université Moulay Ismail Marjane 2, B.P. 15290 Al Mansour, Meknès Maroc

*(auteur correspondant : michel.havet@oniris-nantes.fr)

Résumé - Cette étude présente une évaluation numérique de l'intégration de matériaux à changement de phase (MCP) sur la surface intérieure des parois des chambres froides afin d'en améliorer l'efficacité énergétique, la stabilité de la température des produits et la flexibilité énergétique. Un modèle dynamique de stockage frigorifique a été développé à l'aide d'EnergyPlus en co-simulation avec MATLAB pour prendre en compte l'impact sur la température des produits stockés à température positive (produits frais) et négative (produits congelés). L'impact des MCP sur la consommation d'énergie et la fluctuation de la température des produits a été analysé. Les résultats montrent que l'intégration des MCP limite efficacement les variations de température des produits, améliorant ainsi la stabilité thermique dans diverses conditions de fonctionnement. Cependant, dans la plupart des scénarios, les économies d'énergie restent négligeables sans la mise en œuvre d'une stratégie de contrôle de la production de froid. Lorsqu'ils sont associés à une approche de réponse à la demande, les MCP permettent une réduction d'énergie significative tout en préservant la qualité des produits. Cela souligne l'importance des stratégies de contrôle actif pour exploiter pleinement le potentiel d'économie d'énergie des MCP dans les applications de stockage frigorifique.

Nomenclature

<i>A</i>	Surface d'échange, m^2	<i>V</i>	Volume, m^3
<i>Cond</i>	Conduction	<i>χ</i>	Fraction massique, $kg \cdot kg^{-1}$
<i>Conv</i>	Convection	<i>ε</i>	Porosité
<i>c_p</i>	Chaleur spécifique, $J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$	<i>θ</i>	Coefficient de la courbe de performance
<i>D_{Pom}</i>	Diamètre de la pomme, <i>m</i>	<i>ρ</i>	Masse volumique, $kg \cdot m^{-3}$
<i>h</i>	Enthalpie massique, $J \cdot kg^{-1}$	<i>α</i>	diffusivité thermique, $m^2 \cdot s^{-1}$
<i>i</i>	Pas spatial	<i>λ</i>	Conductivité thermique $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$
<i>j</i>	Pas temporel	<i>App</i>	Apparente
<i>Lat</i>	Chaleur latente, $J \cdot kg^{-1}$	<i>CF</i>	Chambre froide
<i>m</i>	Masse, kg	<i>ESR</i>	European Standard Rating
<i>ṁ</i>	Débit masse, $kg \cdot s^{-1}$	<i>EUR</i>	Euro
<i>Moy</i>	Moyen	<i>GES</i>	Gaz à effet de serre
<i>n</i>	Indice de phase	<i>MAD</i>	Dirham marocain
<i>Pom</i>	Pomme	<i>MCP</i>	Matériaux à changement de phase
<i>r</i>	Rayon, <i>m</i>	<i>PSE</i>	Polystyrène extrudé
<i>Resp</i>	Respiration	<i>RAH</i>	Renouvellement d'air par heure
<i>Suf</i>	Surface	<i>RD</i>	Réponse à la demande
<i>t</i>	Temps, <i>s</i>	<i>ZC</i>	Zone de chargement
<i>T</i>	Température, °C		

1. Introduction

L'infrastructure de la chaîne du froid joue un rôle essentiel dans le maintien de la qualité des produits périssables. Elle permet d'allonger la durée de conservation, de préserver la valeur nutritionnelle et de réduire le gaspillage. Cette infrastructure repose principalement sur des systèmes de réfrigération à cycle de compression de vapeur, mis en œuvre tout au long de la chaîne du froid, de la post-récolte à la distribution. Malgré son rôle crucial, ce secteur est

considéré comme l'un des contributeurs importants aux émissions de gaz à effet de serre (GES). L'empreinte carbone du secteur se divise en deux catégories. Les émissions directes (40 %) proviennent du transport et des fuites de fluides frigorigènes. Le transport contribue à hauteur de 47 MtCO₂ et les fuites génèrent 57,4 MtCO₂, représentant 18% et 22% des émissions totales [1]. Les émissions indirectes (60 %) sont dues à la consommation d'électricité des systèmes de réfrigération [2]. En 2017, la chaîne du froid mondiale a consommé plus de 280 TWh d'électricité, ce qui a entraîné environ 156 MtCO₂ d'émissions indirectes [3]. Les systèmes de réfrigération des installations d'entreposage frigorifique représentent généralement 60 à 80 % de la demande énergétique totale de ces installations [4]. Par conséquent, améliorer l'efficacité énergétique de ces systèmes offre des avantages énergétiques et économiques substantiels. Les MCP constituent une approche prometteuse pour répondre à ces défis.

Les MCP stockent et libèrent de l'énergie thermique sous forme de chaleur latente lors des transitions de phase, généralement entre les états solide et liquide. Grâce à ce mécanisme, l'intégration de MCP dans les systèmes de réfrigération pourrait améliorer l'efficacité énergétique en déplaçant la demande d'énergie de refroidissement et en prolongeant les cycles d'arrêt du compresseur, conduisant à une réduction de la consommation d'énergie et des émissions de GES. Baffa et al. [5] ont étudié la performance d'une CF intégrant des MCP. Les résultats ont démontré que l'intégration des MCP diminuait le temps de fonctionnement du compresseur par rapport au modèle de référence. Cela a conduit à un nombre réduit de cycles de dégivrage et à stabiliser la température, aboutissant finalement à une réduction de 30% de la consommation énergétique totale. Néanmoins, l'intégration des MCP ne génère pas toujours des économies d'énergie. Certaines études ont rapporté des améliorations minimales de l'efficacité ou même de légères augmentations de la consommation globale [6–8]. Par exemple, Yusufoglu et al. [8] ont étudié l'effet de l'intégration de quatre MCP différents sur l'évaporateur d'un réfrigérateur domestique. Leurs résultats ont montré qu'en conditions de fonctionnement normal, le réfrigérateur équipé de MCP présentait une augmentation de la consommation énergétique quotidienne de 1,4 à 4 %, selon le type de MCP. Cette hausse a été principalement attribuée à la masse thermique supplémentaire introduite par le MCP, ce qui a accru la charge frigorifique pendant la phase de charge (solidification). Néanmoins, l'étude a démontré que les MCP peuvent stabiliser efficacement la température de l'air interne pendant les cycles d'arrêt du compresseur et les ouvertures de porte. Dans ces situations, le MCP solidifié agit comme un évaporateur auxiliaire, absorbant les charges thermiques et réduisant ainsi l'énergie nécessaire pour ramener la température de l'air au point de consigne après de telles perturbations. De plus, lors des tests d'ouverture de porte, l'étude a rapporté une réduction de la consommation d'énergie quotidienne comprise entre 2,3 % et 5 % par rapport à la configuration de référence, soulignant la capacité des MCP à atténuer les pertes d'efficacité causées par des ouvertures de porte fréquentes.

La présente étude vise à développer un modèle dynamique d'un entrepôt réfrigéré intégrant des MCP conventionnels afin d'évaluer leur impact sur la consommation d'énergie, les coûts et la qualité des produits.

2. Matériels et Méthodes

2.1. EnergyPlus : Modélisation de l'entrepôt

Cette étude utilise EnergyPlus, un logiciel open source de modélisation énergétique des bâtiments, pour simuler l'entrepôt, les MCP et le système de réfrigération. EnergyPlus s'appuie sur les bilans de transfert de chaleur et d'humidité, en supposant des propriétés d'air uniformes (température, pression et densité...) dans chaque zone thermique [9]. Les couches d'une paroi sont modélisées dans EnergyPlus via la méthode des différences finies par conduction (CondFD), qui discrétise chaque couche en plusieurs nœuds spatiaux (Figure 1). Cette approche résout l'équation de diffusion thermique 1D de manière implicite à chaque pas de temps, permettant de capturer les gradients de température au sein de chaque couche.

$$\rho c_p \Delta x \frac{T_i^{j+1} - T_i^j}{\Delta t} = \lambda_{i,i+1} \frac{(T_{i+1}^{j+1} - T_i^{j+1})}{\Delta x} + \lambda_{i,i-1} \frac{(T_{i-1}^{j+1} - T_i^{j+1})}{\Delta x} \quad (1)$$

i : nœud modélisé ; $i+1$: nœud suivant ; $i-1$: nœud précédent ; $j+1$: nouvel intervalle de temps ; $j-1$: intervalle de temps précédent ; $\lambda_{i,i+1}$ et $\lambda_{i,i-1}$: conductivité thermique entre les nœuds i et $i+1$, et i et $i-1$, respectivement.

Pour les couches de MCP, cette discrétisation est couplée au modèle enthalpie-température (One-curve model), où la capacité thermique apparente $c_{p,App}$ est évaluée localement à chaque nœud i et à chaque pas de temps j . Ce modèle repose sur la méthode de Morgan, qui nécessite des données tabulées de la fonction $h_j = f(T_j)$ pour établir le processus de transition de phase. $c_{p,App}$ est définie comme le quotient différentiel de l'enthalpie par rapport à la température [9].

$$c_{p,App} = (h_i^{j+1} - h_i^j) / (T_i^{j+1} - T_i^j) \quad (2)$$

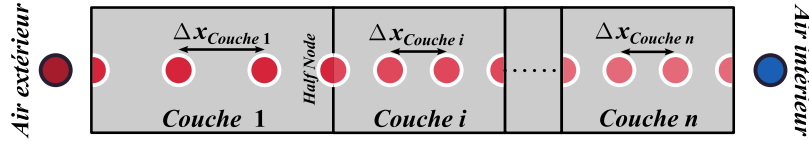


Figure 1: Représentation des nœuds pour un modèle de conduction par différences finies.

Le système de réfrigération dans EnergyPlus se compose de trois composants principaux : le compresseur, le condenseur et l'évaporateur. Le logiciel utilise des données de performance dans des conditions nominales, combinées à des courbes de performance fournies par le fabricant, pour modéliser ces composants [9].

2.2. Approche de co-simulation

EnergyPlus ne dispose pas de la fonctionnalité permettant de simuler les produits entreposés. Par conséquent, cette étude met en œuvre une approche de co-simulation reliant EnergyPlus à MATLAB. L'outil EnergyPlus-MLE+ [10] sur MATLAB, cela facilite l'échange de données entre les deux plateformes, permettant une communication synchronisée et maintenant la cohérence temporelle tout au long de la simulation. L'échange de données suit la procédure illustrée sur la Figure 2.

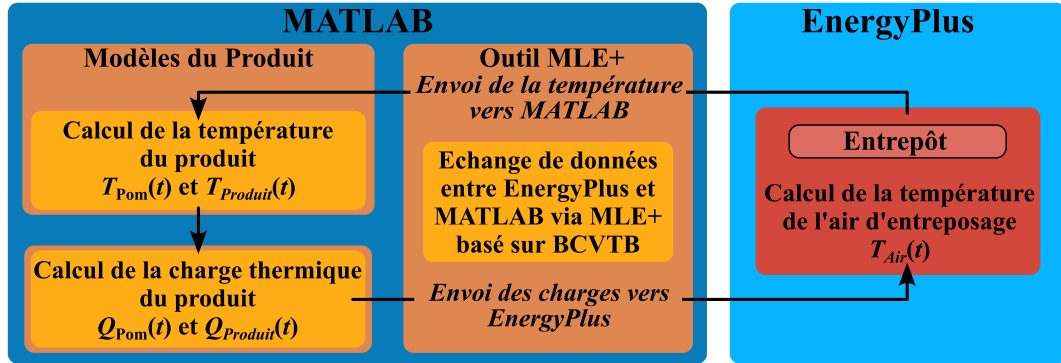


Figure 2: Approche de co-simulation entre EnergyPlus et MATLAB, et données échangées.

2.3. Description des Modèles de Produits (MATLAB)

2.3.1. Modèle de produit réfrigéré (pommes fraîches)

La température moyenne de pommes fraîches (réfrigération positive) est simulée à l'aide d'un modèle simplifié développé par Van Der Sman [11]. Pour un aliment sphérique, la température moyenne est égale à celle à $r = 3D_{Pom}/8$ (Figure 3-a), où l'équation de la chaleur s'écrit comme suit :

$$\rho_{Pom} \times c_{p,Pom} \times V_{Pom} \frac{dT_{Pom,Moy}}{dt} = \frac{T_{Air}(t) - T_{Pom,Moy}}{R_{Cond} + R_{Conv}} \quad (3)$$

Étant donné que la température de l'air (T_{Air}) est considérée comme constante à chaque itération de l'échange de données, Équation (3) admet une solution analytique de la forme :

$$T_{Pom,Moy}(t) = T_{Air}(t) + (T_{Pom,Moy}(0) - T_{Air}(t)) \times e^{\left(\frac{-t}{\rho_{Pom} \times c_{p,Pom} \times V_{Pom} \times (R_{Cond} + R_{Conv})}\right)} \quad (4)$$

$$T_{Pom,Surf}(t) = \frac{T_{Air}(t) \times R_{Cond} + T_{Pom,Moy}(t) \times R_{Conv}}{R_{Cond} + R_{Conv}} \quad (5)$$

où $R_{Cond} = d_c / (A_{Pom} \cdot \lambda_{Pom})$ et $R_{Conv} = 1 / (A_{Pom} \cdot h_{Conv})$ représentent les résistances thermiques par conduction et convection, respectivement, et d_c est la longueur caractéristique $= D_{Pom} / 8$.

Les pommes, initialement à 20°C, sont entreposées dans des pallox modélisés comme des échangeurs de chaleur (Figure 3-b). La méthode de la différence de température moyenne logarithmique (LMTD) est utilisée pour décrire le changement non linéaire de température entre les pommes et l'air d'entreposage (Figure 3-c). Le transfert de chaleur convectif total (Q_{Conv}) est écrit comme suit :

$$Q_{Conv}(t) = h_{Conv} \times N_{Pom} \times A_{Pom} \times \frac{(T_{Pom,Surf}(t) - T_{Air,Entrée}(t)) - (T_{Pom,Surf}(t) - T_{Air,Sortie}(t))}{\ln(T_{Pom,Surf}(t) - T_{Air,Entrée}(t)) - \ln(T_{Pom,Surf}(t) - T_{Air,Sortie}(t))} \quad (6)$$

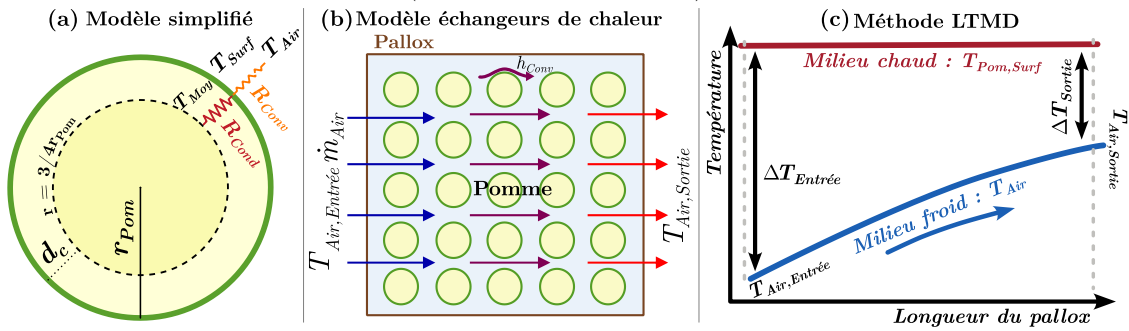


Figure 3: Représentation : (a)- du modèle simplifié, (b)- pallox de pommes, (c)- de la méthode LMTD.

De plus, la charge thermique totale des pommes doit prendre en compte la chaleur générée par la respiration (Q_{Resp}). La corrélation établie a été développée par [12], où m et T_{Pom} sont la masse et la température de la pomme, $a = 5.69 \times 10^{-4}$ et $b = 2.60$ sont les coefficients de respiration [12].

$$Q_{Resp}(t) = m \times 0.003 \times a \times (1.8 \times T_{Pom}(t) + 32)^b \quad (7)$$

La charge thermique totale est donc la somme de la charge convective et de la respiration. Puisque les pommes ne subissent pas de changements de phase, leurs propriétés thermophysiques sont considérées comme constantes (Tableau 1).

Propriétés	CFs-Positives	CFs-Négative
Conductivité thermique ($W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$)	0,406	$\lambda_{Produit}(T)$
Masse volumique ($kg \cdot m^{-3}$)	837,22	$\rho_{Produit}(T)$
Capacité thermique ($J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$)	3821,96	$c_{p,App,Produit}(T)$
Coefficient h_{Conv} ($W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$)	2	10

Tableau 1: Propriétés thermiques de la pomme utilisée dans le modèle de produit [13–14].

2.3.2. Modèle de produit congelé (compote de pommes)

Cette section décrit le modèle utilisé pour prédire l'évolution de la température au sein des palettes de compote de pommes, initialement congelées à -17.5°C. Le produit est modélisé comme une plaque plane d'épaisseur L . Le transfert thermique par conduction dans le produit congelé est régi par l'équation de diffusion de la chaleur (Équation (8)). Les propriétés thermophysiques des produits alimentaires (Équation (9)), telles que la masse volumique ($\rho_{Produit}$), la conductivité thermique ($\lambda_{Produit}$) et la chaleur spécifique ($c_{p,App,Produit}$), dépendent de la température et sont calculées à l'aide du modèle additif [15]. Équation (10) est utilisée pour simuler le changement de phase [15]. Dans cette méthode, $c_{p,App,Produit}$ inclut la chaleur latente associée à la formation de glace, où $c_{p,n}$ est la capacité thermique des composants du produit

alimentaire ; Lat est la chaleur latente de la glace ; $\chi_{Glacé}$ et χ_n représentent respectivement les fractions de glace et de composants du produit.

$$\rho_{Produit}(T) c_{p,App,Produit}(T) \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot (\lambda_{Produit}(T) \nabla T) ; -\lambda_{Produit} \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=0} = h_{Conv} (T(0,t) - T_{Air}) ; -\frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=L/2} = 0 \quad (8)$$

$$\rho_{Produit}(T) = (1-\varepsilon) \sum_n \left(\frac{\chi_n(T)}{\rho_n(T)} \right)^{-1} ; \lambda_{Produit}(T) = \rho_{Produit}(T) \sum_n \frac{\chi_n(T) \lambda_n(T)}{\rho_n(T)} ; c_{p,App,Produit}(T) = \sum_n \chi_n(T) c_{p,n}(T) \quad (9)$$

$$c_{p,App,Produit}(T) = \sum_n \chi_n(T) c_{p,n}(T) - Lat \frac{d\chi_{Glacé}}{dT} \quad (10)$$

2.4. Installation d'entrepôt réfrigéré

2.4.1. Configuration géométrique

Le modèle est basé sur un entrepôt réfrigéré réel « PRIMLAND » situé dans la zone périurbaine de Meknès, au Maroc. L'entrepôt a une surface totale de 2 592 m² (72×36×8 m), composée de 3 CFs positives utilisées pour le stockage de pommes fraîches à 1±1°C, 3 CFs négatives utilisées pour le stockage de purée de pommes congelée à -18±1°C, et une zone de chargement. Le choix de l'épaisseur de l'isolation est conforme aux directives spécifiées dans [16], qui fournit des recommandations pour la construction d'entrepôts réfrigérés en fonction des exigences de température de stockage. Une isolation en PSE est utilisée pour le matériau de construction des murs, avec une épaisseur de 100 mm pour le groupe de CFs positives et de 200 mm pour le groupe de CFs négatives

2.4.2. Données d'entrée du modèle

La période de simulation est de 6 mois, du 1^{er} octobre au 31 mars, avec des données météorologiques pour Meknès obtenues du site climate.onebuilding.org [17]. Meknès se situe dans le centre-nord du Maroc et fait partie de la Zone climatique 3 marocaine, caractérisée par un climat méditerranéen subtropical avec une influence continentale. Cette zone présente des étés chauds et secs et des hivers doux et humides [18]. L'unité frigorifique de l'entrepôt utilise le R-455A comme fluide frigorigène, bien adapté aux applications à basse température. Le système de compression utilise des unités de compresseur semi-hermétiques de Bitzer avec différentes configurations pour chaque application. Les systèmes intègrent plusieurs arrangements de compresseurs connectés en parallèle. La configuration du groupe de CFs positives comprend 8 compresseurs connectés à 4 évaporateurs (air-chiller), 3 unités desservent les CFs et 1 unité est dédiée à la zone de chargement. Le groupe de CFs négatives se compose de 7 compresseurs reliés à 3 évaporateurs. Chaque batterie de refroidissement est dimensionnée spécifiquement en fonction de son application prévue et basée sur le catalogue [19]. Les air-chillers des CFs positives fonctionnent selon les European Standard Rating 2 (ESR 2) avec une température d'évaporation de -8°C, tandis que pour les CFs négatives les batteries fonctionnent selon les conditions ESR 3 avec une température d'évaporation de -25°C. Le Tableau 2 récapitule les détails sur les données d'entrée du modèle pour l'entrepôt.

Charges internes	Produit stocké	CFs Positive	444,3 tonnes/CF
		CFs Negative	915 tonnes/CF
	Éclairage	6.5 W/m ²	
	Ventilation	CFs Positive	1800 W
Air-Chiller (Évaporateur)	Capacité frigorifique	CFs Negative	7600 W
		CFs Positive	30,6 kW
	Débit d'air	CFs Negative	30,7 kW
		ZC	20,9 kW
		CFs Positive	5,88 m ³ ·s ⁻¹
Compresseur	Puissance frigorifique	CFs Negative	12,89 m ³ ·s ⁻¹
		ZC	2,64 m ³ ·s ⁻¹
		CFs Positive	80 kW
		CFs Negative	70 kW

Tableau 2: Paramètres d'entrée du modèle pour l'entrepôt frigorifique.

2.5. Matériaux à changement de phase

Deux configurations sont étudiées : la configuration de référence avec une couche d'isolation PSE et la configuration avec une couche de MCP de 2 cm intégrée sur la surface des parois internes de l'entrepôt frigorifique. Pour simplifier la modélisation, un profil enthalpie-température linéaire a été adopté pour créer les données nécessaires pour modéliser les MCP. La température de changement de phase des MCP est choisie en fonction de la température de la surface intérieure des murs. Figure 4 présente la courbe $h_j = f(T_j)$ des MCP Rubitherm GmbH utilisés pour les CFs positives et négatives.

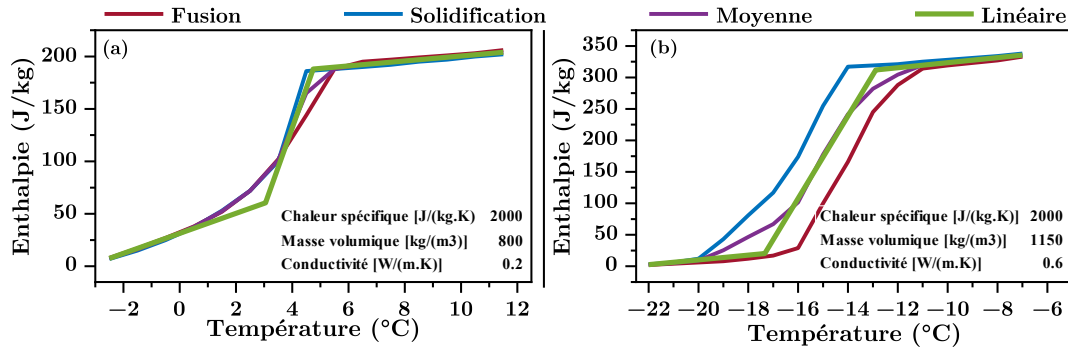


Figure 4: Enthalpie-température des MCP modélisés dans : (a)- CFs positives, (b)- CFs négatives.

2.6. La Réponse à la Demande (RD)

La RD est la modulation volontaire de la consommation d'électricité par les consommateurs en réponse à des signaux du réseau, tels que les périodes de forte demande ou les variations de prix. Cette approche stratégique vise à équilibrer l'offre et la demande. La structure tarifaire de l'électricité pour un usage professionnel au Maroc dépend principalement des saisons et des plages horaires de consommation. Le tarif de la saison hivernale va du 1^{er} octobre au 31 mars. Tableau 3 présente le changement horaire de l'électricité et la structure tarifaire pour cette saison au Maroc. L'objectif ici est de simuler l'entrepôt mettant en œuvre la RD, avec l'arrêt du système de réfrigération pendant 5 heures de pointe sur la période de simulation, et d'évaluer l'impact des MCP.

Horaires	Saison hivernale	Dirhams par kWh
Heures de pointe	17h00 à 22h00	1,3548
Heures creuses	22h00 à 17h00	1,0657

Tableau 3: Périodes saisonnières et changements horaires.

3. Résultats et discussion

3.1. Impact de la DR sur la Performance de l'Entrepôt

3.1.1. Performance en Température Pendant les Événements de RD

Les profils de température illustrés sur la Figure 5 confirment l'effet de stabilisation thermique de l'intégration des MCP pendant l'interruption de courant de 5 heures due à la RD. Pour le groupe de CFs positives (Figure 5-a), la température maximale de l'air a atteint 6°C dans la configuration sans MCP (RD+SansMCP), soit 1°C de plus que le système intégrant des MCP (RD+MCP). Les températures de surface des produits stockés ont montré une réponse thermique plus lente en raison de l'inertie thermique plus élevée des produits, atteignant 3,5°C pour la configuration RD+SansMCP et 3°C pour les configurations RD+MCP. Cet avantage résulte du fait que le PCM agit comme un tampon thermique en absorbant les charges thermiques pendant les périodes de DR, atténuant ainsi l'augmentation de la température et prolongeant ainsi les périodes de stockage en toute sécurité. En revanche, le groupe de CFs négatives (Figure 5-b) a présenté une plus grande stabilité thermique dans les deux configurations (avec/sans MCP), les températures de l'air et des produits affichant des augmentations minimales. Cette stabilité est attribuée à l'inertie thermique substantielle des produits congelés, qui agissent comme des tampons thermiques lors des RD.

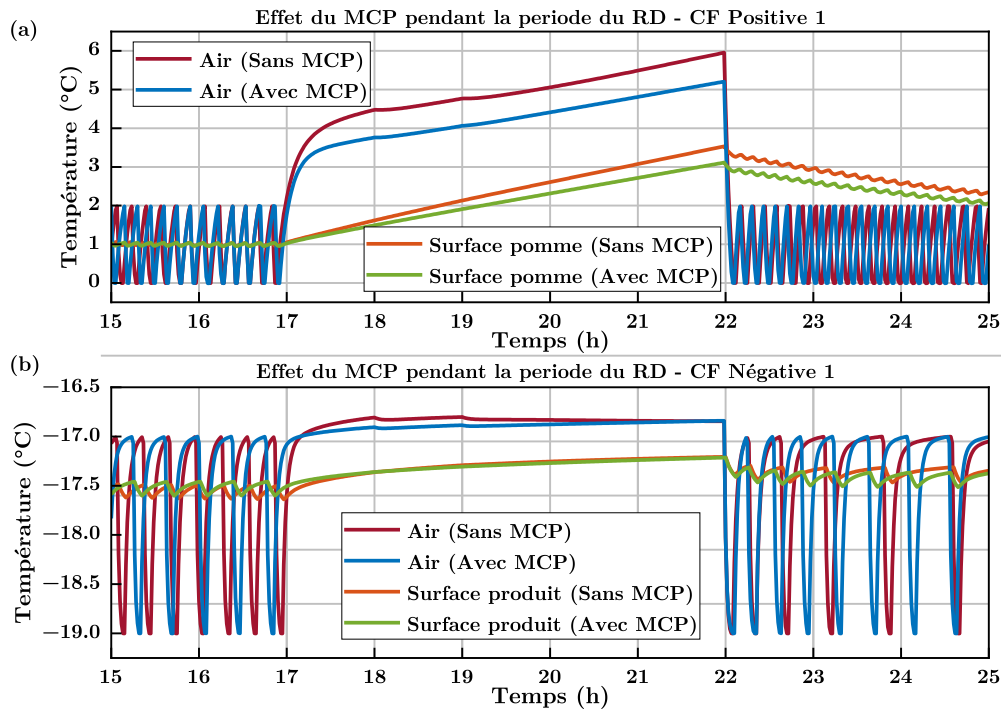


Figure 5: Température de l'air et des produits pendant la RD : (a)- CFs positives, (b)- CFs négatives.

3.1.2. Analyse Énergétique et Économique

Pour le groupe de CFs positives, la référence a consommé 57,28 MWh (19,69 % pendant les heures de pointe). La RD sans MCP (RD+SansMCP) a éliminé la consommation de pointe mais a augmenté l'énergie totale à 59,01 MWh (+3,02 %). La RD avec MCP (RD+MCP) a atteint 58,25 MWh (+1,68 % par rapport à la référence), réduisant la consommation de 0,76 MWh (1,29 %) par rapport à la RD+SansMCP grâce aux effets de tampon thermique des MCP. Cette augmentation de la consommation d'énergie globale est une conséquence directe de l'augmentation de la demande de refroidissement nécessaire pour ramener les températures à la consigne après l'événement de RD. À l'inverse, le groupe de CFs négatives n'a montré aucune différence significative dans la consommation d'énergie entre les configurations RD avec et sans MCP, toutes deux entraînant une légère réduction de l'énergie totale de -0,30 % (52,14 MWh) par rapport à la référence (52,29 MWh). Ceci est obtenu grâce à l'inertie thermique des produits congelés.

D'un point de vue économique, les résultats de l'analyse sont différents. Pour les CFs positives, la configuration RD+SansMCP a généré une économie de coûts de -2,20 %, se traduisant par une réduction des coûts d'électricité de -1 417,19 MAD malgré l'augmentation rapportée de la consommation totale d'énergie. Cela confirme l'intérêt d'éliminer la consommation pendant les heures de pointe. L'intégration des MCP (RD+MCP) a encore réduit les coûts à -2 234,81 MAD, réalisant une économie totale de -3,48 % par rapport à la référence, représentant une amélioration supplémentaire de 1,28 % par rapport au scénario RD+SansMCP. Pour les CFs négatives, les deux configurations, avec/sans MCP, ont atteint des économies quasi similaires, d'environ -2 634 MAD qui représentent une réduction de -4,5 % par rapport à la référence. Cela confirme que les avantages économiques du décalage de charge peuvent être pleinement réalisés, même sans intégration de MCP dans les applications de stockage congelé, en raison de la stabilité thermique fournie par les produits congelés.

4. Conclusion

Cette étude a évalué l'intégration des MCP dans les parois d'entrepôts frigorifiques afin d'améliorer l'efficacité énergétique et de maintenir la qualité des produits. Les résultats montrent que les MCP apportent des bénéfices thermiques importants pour les chambres froides positives lors des interruptions d'électricité, en réduisant les variations de température de l'air

et des produits de 1°C et 0,5°C respectivement. Pour le stockage congelé, la masse thermique des produits congelés assure une stabilité suffisante sans nécessiter de MCP. L'analyse économique révèle que la stratégie d'effacement de la consommation génère des économies significatives. Les chambres froides positives avec MCP réalisent une réduction des coûts de 3,48 %, tandis que le stockage congelé réalise environ 4,5 % d'économies, avec ou sans MCP. En conclusion, bien que les MCP seuls n'apportent pas toujours d'économies énergétiques notables, leur combinaison avec des stratégies de gestion, telles que l'effacement de la consommation, permet un décalage efficace de la demande électrique vers les périodes creuses, générant des avantages économiques tout en préservant la qualité des produits.

Références

- [1] Z. Ouajouja, M. Havet, O. Rouaud, C. Toubanc, and A. Ousegui, "Thermal properties and performance of glycerol-water-NaCl phase change material for cold chain applications," *J. Energy Storage*, vol. 126, p. 117045, Aug. 2025.
- [2] Z. Ouajouja, A. Ousegui, C. Toubanc, O. Rouaud, and M. Havet, "Phase Change Materials for Cold Thermal Energy Storage applications: A critical review of conventional materials and the potential of bio-based alternatives," *J. Energy Storage*, vol. 110, p. 115339, Feb. 2025.
- [3] IEA, "Global CO2 emissions by sector, 2019-2022," International Energy Agency, Paris, 2021.
- [4] K. Wang and N. Du, "Real-time monitoring and energy consumption management strategy of cold chain logistics based on the internet of things," *Energy Informatics*, vol. 8, no. 1, p. 34, Mar. 2025.
- [5] J. Baffa, "Phase Change Material and Controls - Study," 2016.
- [6] Z. Liu, D. Zhao, Q. Wang, Y. Chi, and L. Zhang, "Performance study on air-cooled household refrigerator with cold storage phase change materials," *IJR*, vol. 79, pp. 130–142, July 2017.
- [7] A. Maiorino, M. G. Del Duca, A. Mota-Babiloni, A. Greco, and C. Aprea, "The thermal performances of a refrigerator incorporating a phase change material," *IJR*, vol. 100, pp. 255–264, Apr. 2019.
- [8] Y. Yusufoglu, T. Apaydin, S. Yilmaz, and H. O. Paksoy, "Improving performance of household refrigerators by incorporating phase change materials," *IJR*, vol. 57, pp. 173–185, Sept. 2015.
- [9] EnergyPlus, "EnergyPlus V9.2.0 Documentation: Engineering Reference," DOE, 2019.
- [10] J. Dostal and T. Baumelt, "Model predictive control for buildings with active one-pipe hydronic heating," *E3S Web Conf.*, vol. 111, p. 04050, 2019.
- [11] R. G. M. Van Der Sman, "Simple model for estimating heat and mass transfer in regular-shaped foods," *J. Food Eng.*, vol. 60, no. 4, pp. 383–390, Dec. 2003.
- [12] ASHRAE, *ASHRAE Handbook: Refrigeration*, SI edition. Atlanta, GA: ASHRAE, 2022.
- [13] L. D. Alexander, S. Jakhar, and M. S. Dasgupta, "Influence of pallet height on energy consumption and cooling effectiveness in an apple cold storage," *Sci Rep*, vol. 15, no. 1, p. 11534, Apr. 2025.
- [14] M. E. Castell-Perez, "Freezing Food," in *Introduction to Biosystems Engineering*, ASABE, 2020.
- [15] C. Toubanc and L. Boillereaux, "Food thermal distribution-based control of industrial freezers," presented at the 25th IIR International Congress of Refrigeration, Montréal, Canada, 2019.
- [16] L. K. Lawrie and C. B. Drury, *Development of Global Typical Meteorological Years (TMYx)*.
- [17] BIS 661, "Thermal Insulation of Cold Storage." 2019.
- [18] M. Hanchane, "Morocco, a mosaic of climates," *Encyclopedia of the Environment*, 26-Dec-2024. .
- [19] HK-Refrigeration, "Produits et systèmes de réfrigération commerciale & industrielle," 2021.

Remerciements

Ce travail est le fruit d'une collaboration entre le Laboratoire GEPEA de l'Oniris, à Nantes, France, et l'Université Moulay Ismail, à Meknès, Maroc. Les auteurs expriment leur sincère gratitude au « **Partenariat Hubert Curien (PHC) TOUBKAL 2022** ».