



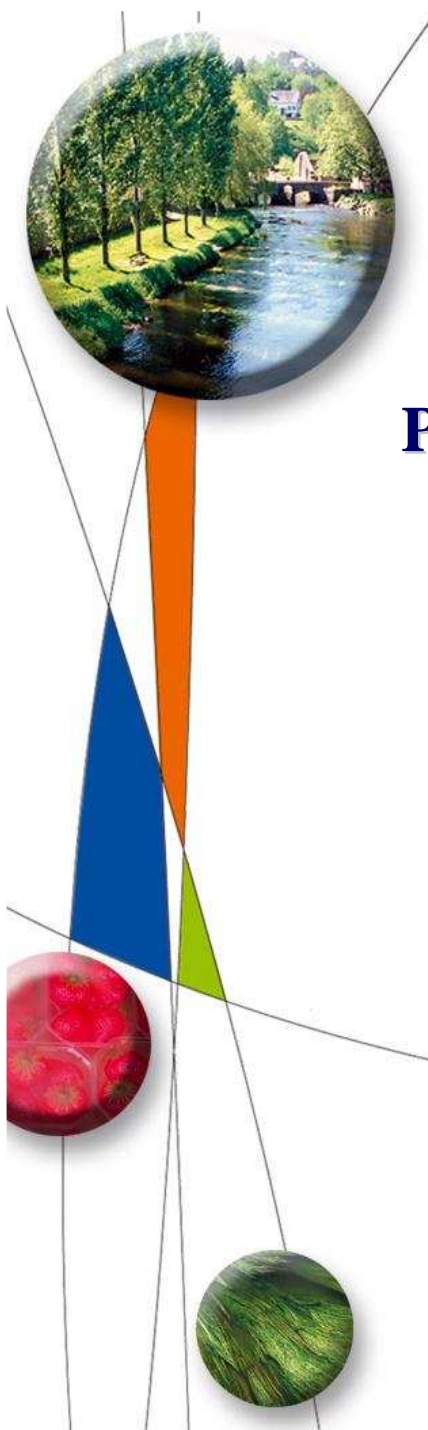
Performances énergétiques d'un réfrigérateur domestique à haute inertie thermique

Kamel Azzouz

Encadrant : Denis Leducq
Directeur de thèse : Dominique Gobin

11 mai 2007

Espace Volcan – Clermont Ferrant

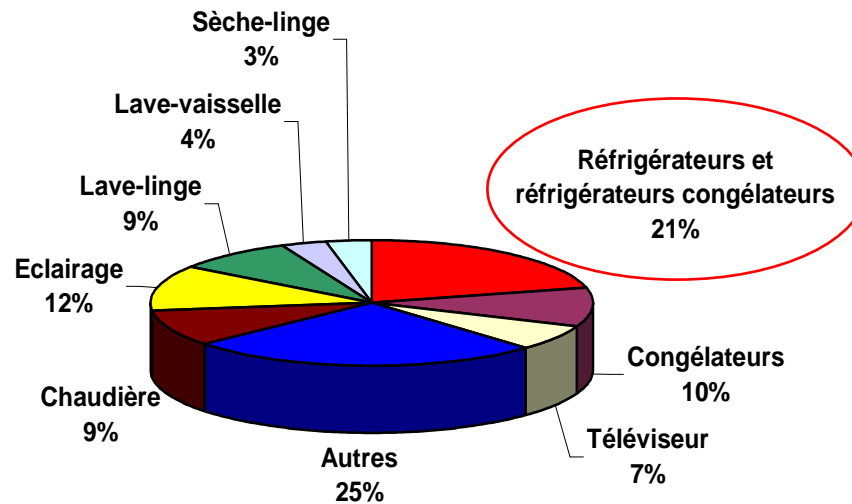


▶ Plan de présentation

- **Introduction**
- **Modèle Numérique**
- **Prototypes et essais réalisés**
- **Résultats expérimentaux**
- **Conclusion**

1 – Contexte : Quelques Chiffres

Part de chaque appareil dans la consommation Électrique domestique en France



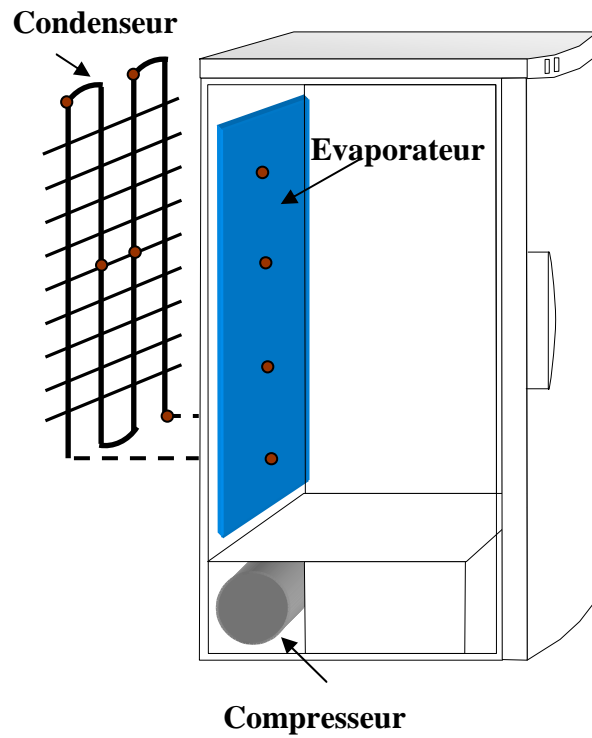
ADEME

Compagne de mesure ECODROME

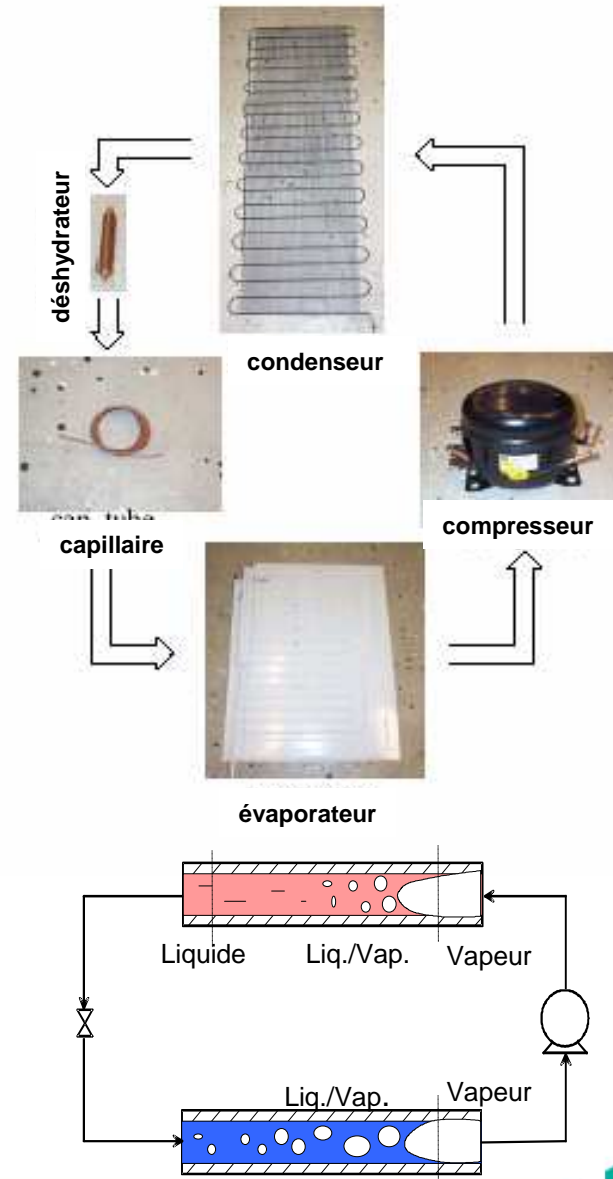
La réfrigération domestique, c'est :

- 37 millions de réfrigérateurs en France
- 18 milliards de kWh consommés
- un équivalent de 2.25 milliards de tonnes de CO₂

2 – Réfrigérateur Domestique Classique



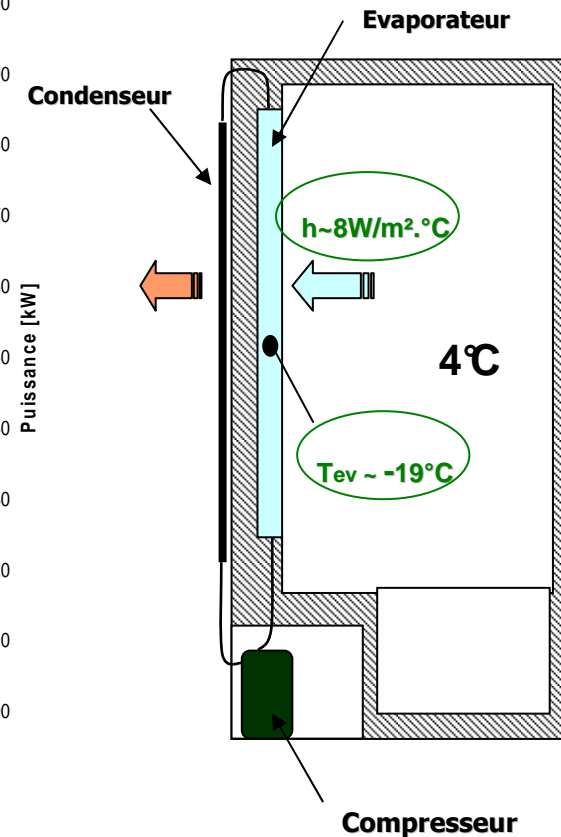
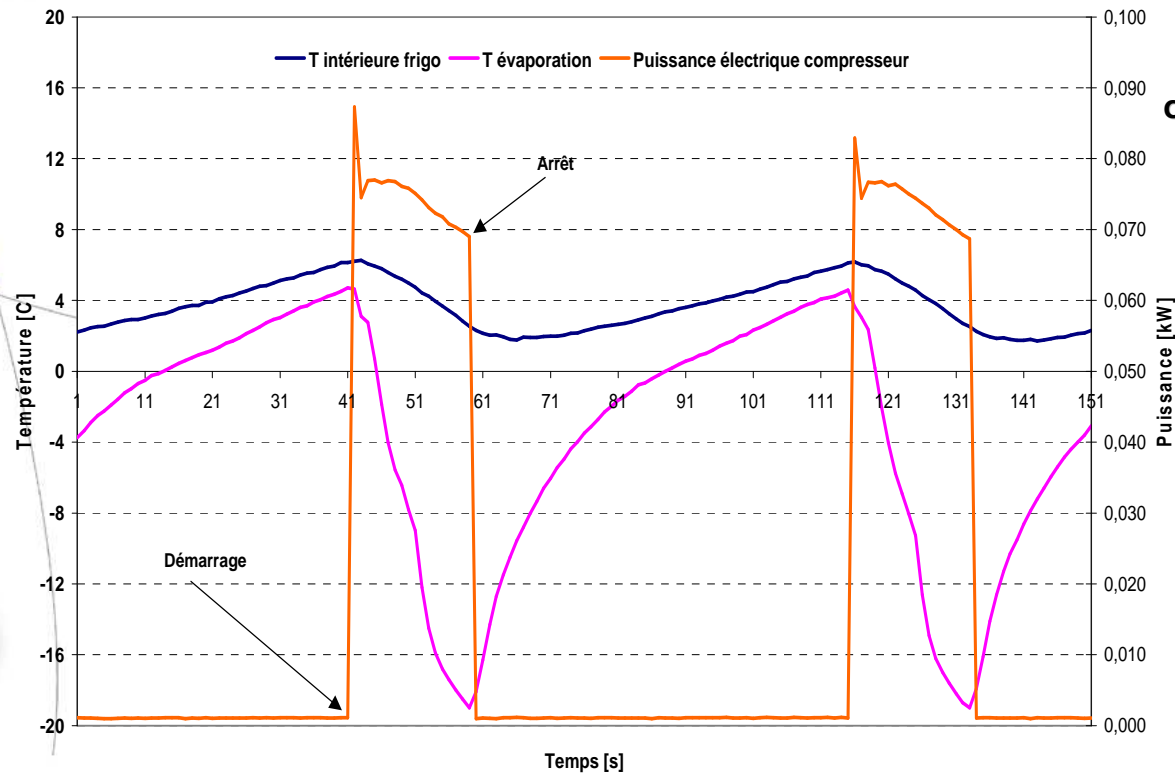
Système à compression de vapeur



2 – Réfrigérateur Domestique Classique

Fonctionnement cyclique du réfrigérateur

Pic de surconsommation électrique au démarrage



$$\text{COP} = \eta_c \frac{T_{\text{evap}}}{T_{\text{cond}} - T_{\text{evap}}}$$

▶ 2 – Résumé



Énergétique

- Le réfrigérateur est l'appareil domestique le plus répandu : 99% des foyers français en sont équipés !
 - Fonctionnant en permanence avec de médiocres performances énergétiques
 - COP de l'ordre de 1
- ➔ **Contribuent à l'effet de serre à hauteur 2.25 milliards de tonnes de CO2**

Sanitaire

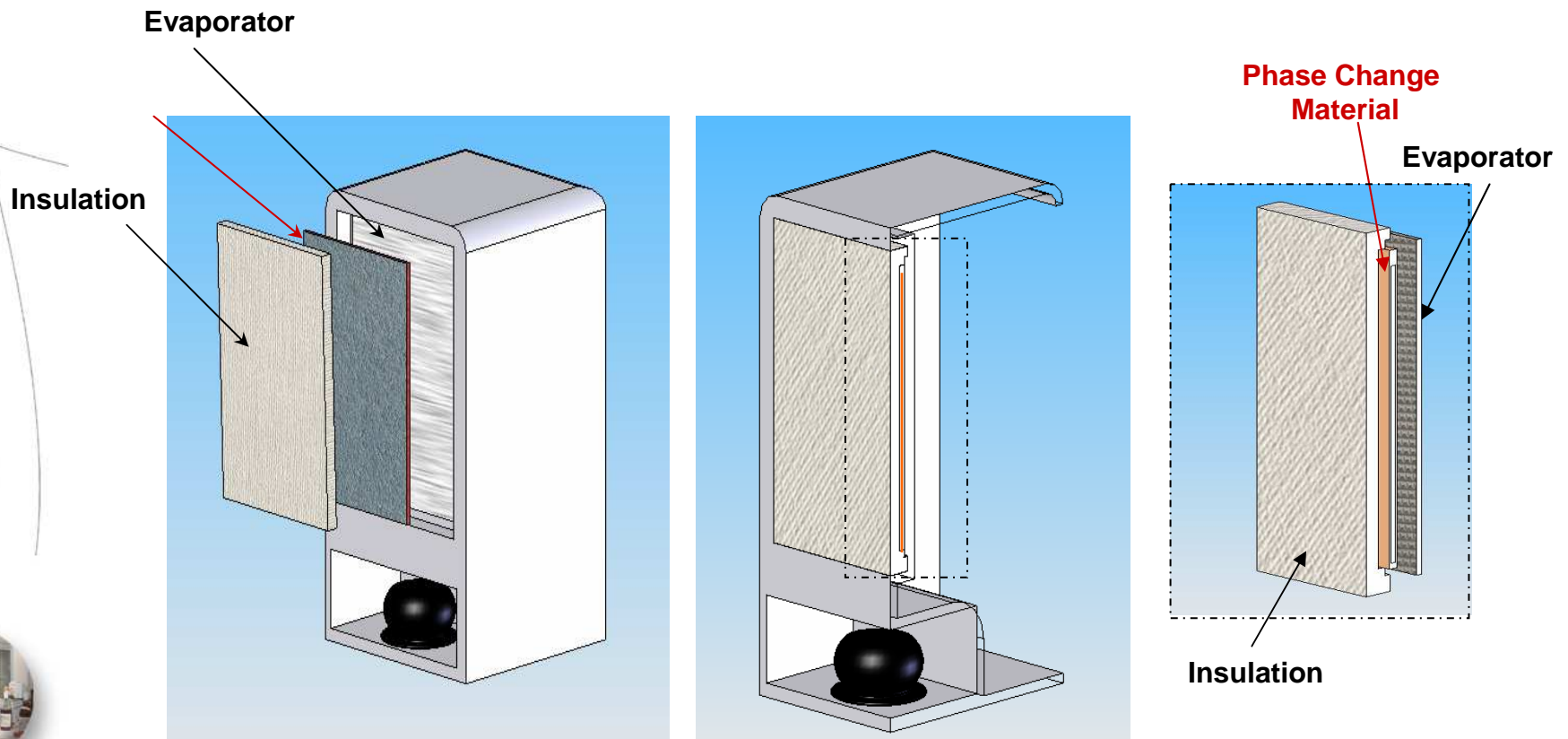
- Importantes fluctuations de températures au niveau du produit alimentaire
 - Augmente le risque de développement bactérien
- ➔ **Réduire la durée de conservation**



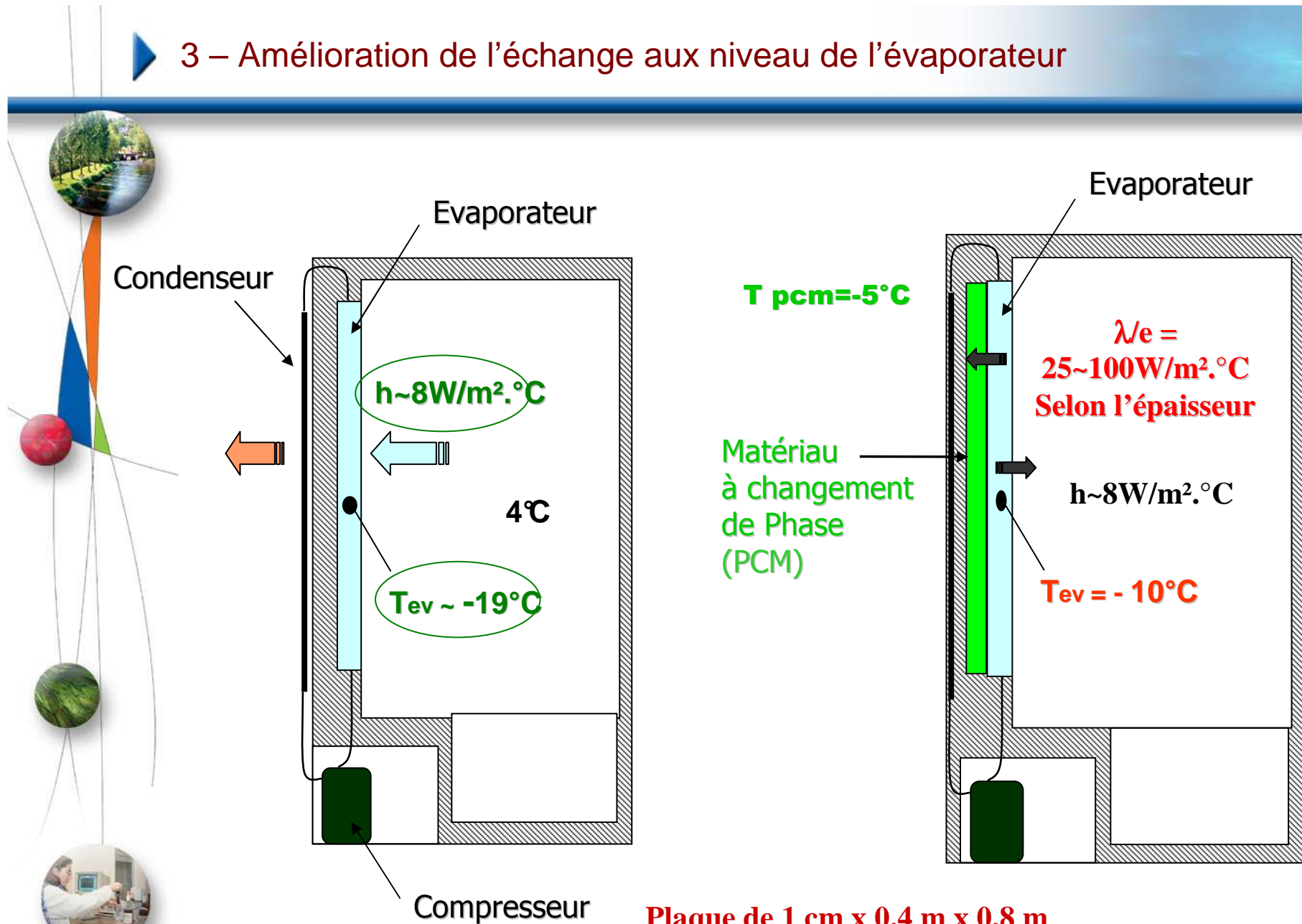
3 – Amélioration de l'échange aux niveau de l'évaporateur

- **Utilisation de Matériau à Changement de Phase (PCM)**

Plaque de 1 cm x 0,4 m x 0,8 m = 2,8 l à 290 kJ/kg ; $T_f = -3^\circ\text{C}$



3 – Amélioration de l'échange aux niveau de l'évaporateur



Plaque de 1 cm x 0,4 m x 0,8 m
= 2,8 l à 290 kJ/kg : 8 h d'autonomie

4 – Modélisation du processus de fusion / solidification dans le PCM

Quantifier l'inertie thermique apportée par le PCM et l'échange de chaleur avec l'évaporateur

Décrire les transferts de chaleur intervenant lors du changement de phase où le mode de transfert est la conduction thermique

particularité: la position de l'interface qui sépare les deux phases est inconnue et évolue au cours du temps

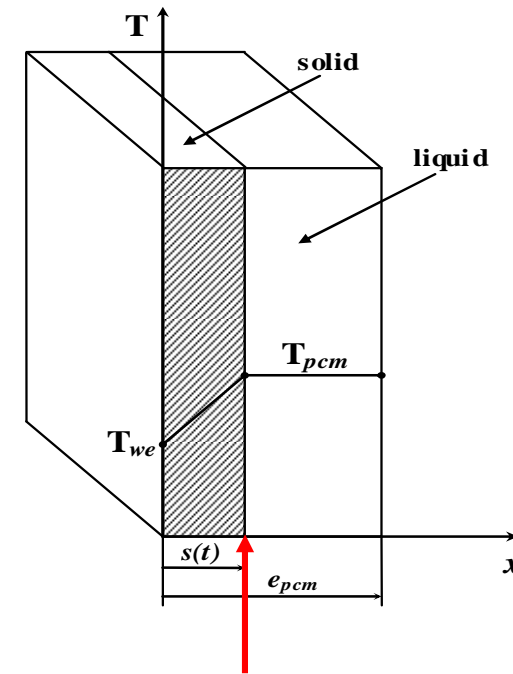
Formulation du problème

$$\rho_l C_{pl}(T) \frac{\partial T_l}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda_l(T) \frac{\partial T_l}{\partial x} \right) \quad \text{solide}$$

$$\rho_s C_{ps}(T) \frac{\partial T_s}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda_s(T) \frac{\partial T_s}{\partial x} \right) \quad \text{liquide}$$

Conditions limites à l'interface $x = s(t)$

$$\rho_s L \frac{ds}{dt} = \lambda_s \frac{\partial T_s}{\partial x} - \lambda_l \frac{\partial T_l}{\partial x}$$



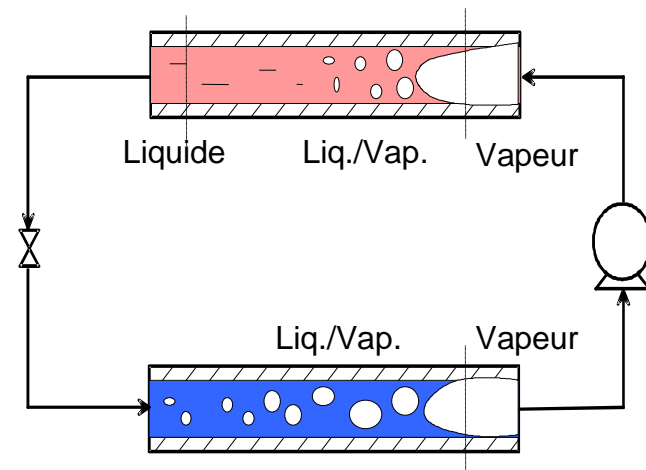
**interface
solide / liquide**

► 5-Modélisation du cycle à compression de vapeur en régime non établi

Comprendre l'impact des régimes transitoires et la durée de la période d'arrêt démarrage sur la consommation énergétique du système

Hypothèses

- **Ecoulement monodimensionnel**
- **Le fluide, à l'état diphasique liquide-vapeur, est décrit comme un pseudo-fluide aux propriétés estimées d'après le titre massique de vapeur**
 - **glissement de vitesses entre phases : corrélation de taux de vide**
- **Équation de quantité de mouvement négligée**
- **Conduction axiale négligée**



5- Modèles numériques des échangeurs de chaleur

cas de l'évaporateur :

conservation de l'énergie du frigorigène :

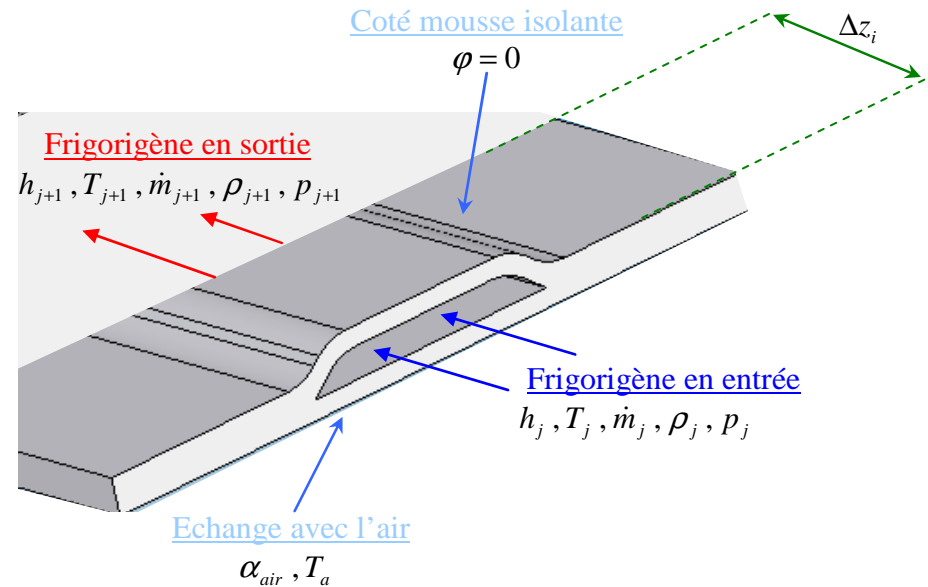
$$\frac{\partial \rho h}{\partial t} + \frac{\partial (\rho u h)}{\partial z} = \frac{\partial p}{\partial t} + \dot{q}$$

conservation de l'énergie de la paroi de l'évaporateur :

$$M_{ev} C_{p,al} \frac{\partial T_p}{\partial t} = \alpha_{air} S_{ev} (T_a - T_p) + \alpha_r \pi d_i (T_r - T_p) + \phi_{PCM}$$

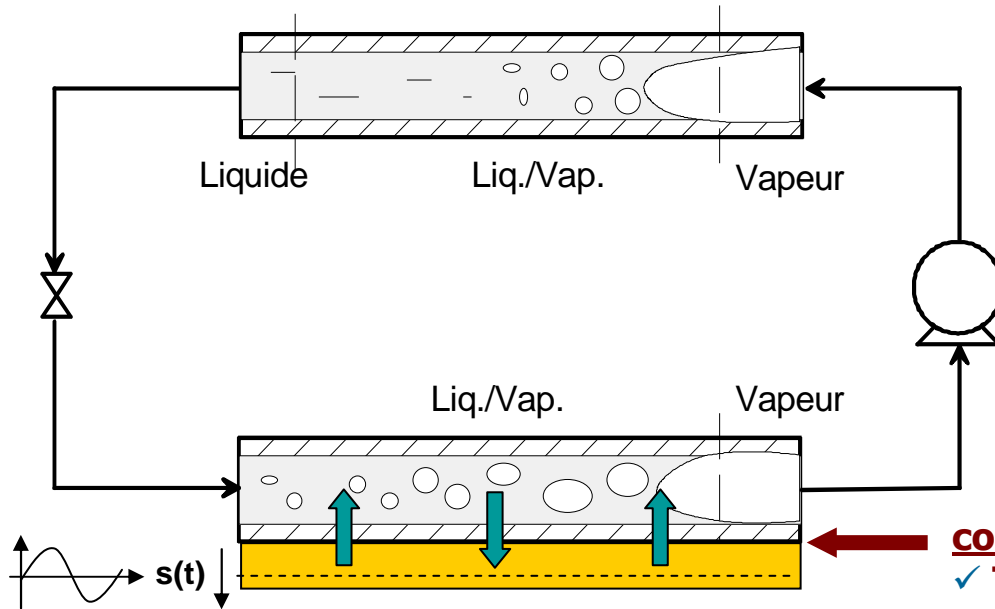
conservation de l'énergie de l'air dans le compartiment du réfrigérateur :

$$\rho_{air} V_{air} \frac{dT_a(t)}{dt} = K_{refri} S_{refri} (T_{ext} - T_a(t)) + \alpha_{air} (T_p - T_a(t))$$



6- Couplage et résolution

➤ Discrétisation des équations : Méthode des volumes finis



➤ Couplage des deux modèles dynamiques :

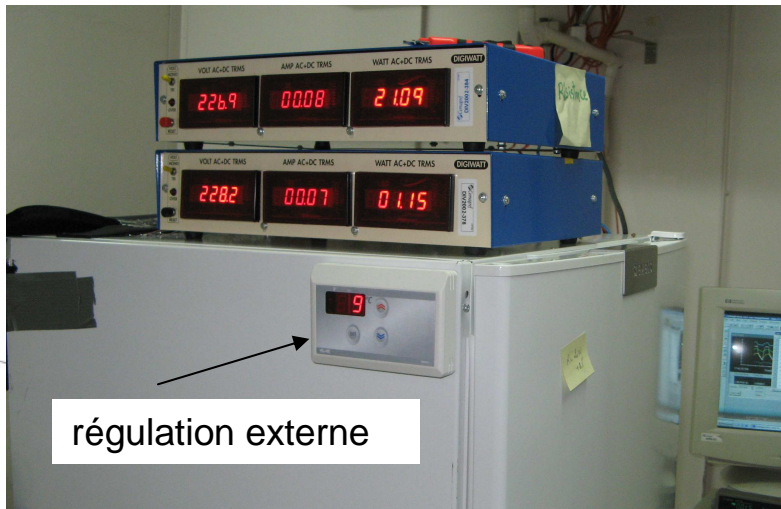
conditions aux limites:
✓ T_p évaporateur
✓ Flux PCM

➤ Système d'équations algébriques non-linéaires

résolu à chaque pas de temps par Newton-Raphson (Résolution directe)

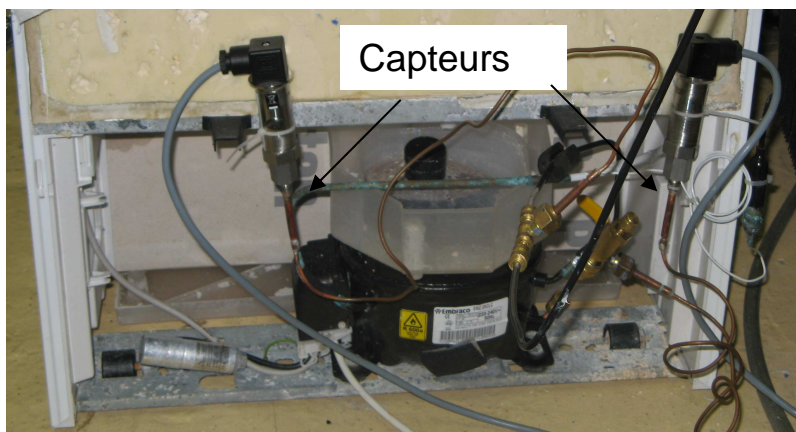
7 – Réalisation expérimentale

intégration d'une régulation adaptée deux épaisseurs d'enveloppe : 5 et 10 mm

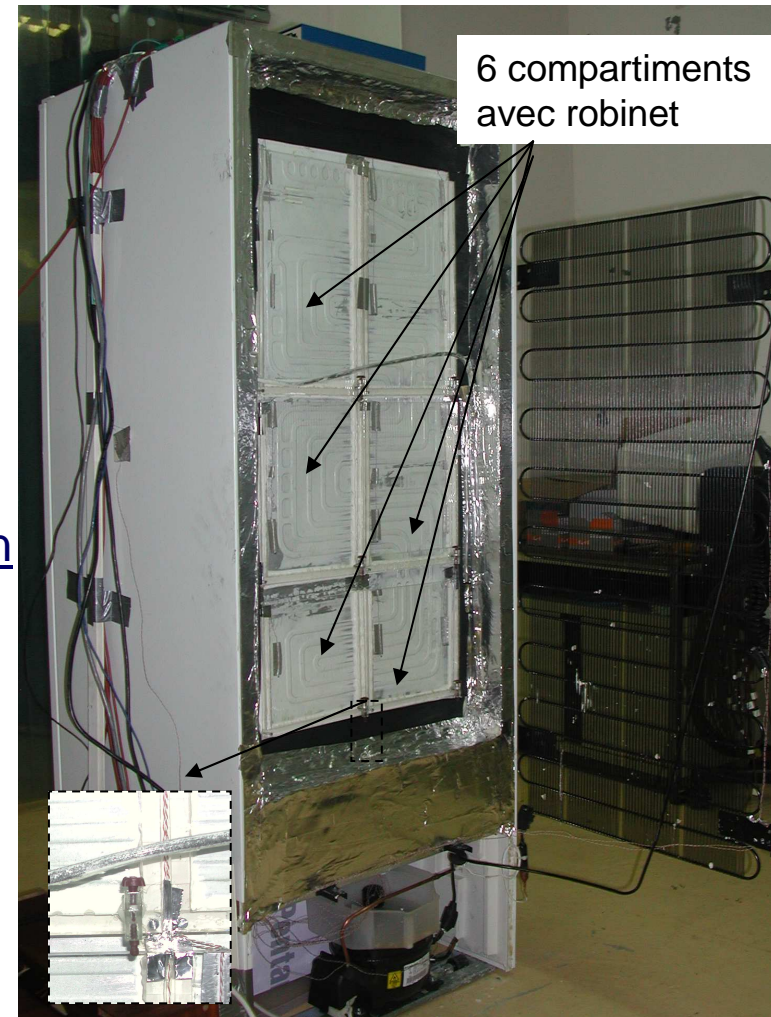


régulation externe

Mise en place de capteurs de pression



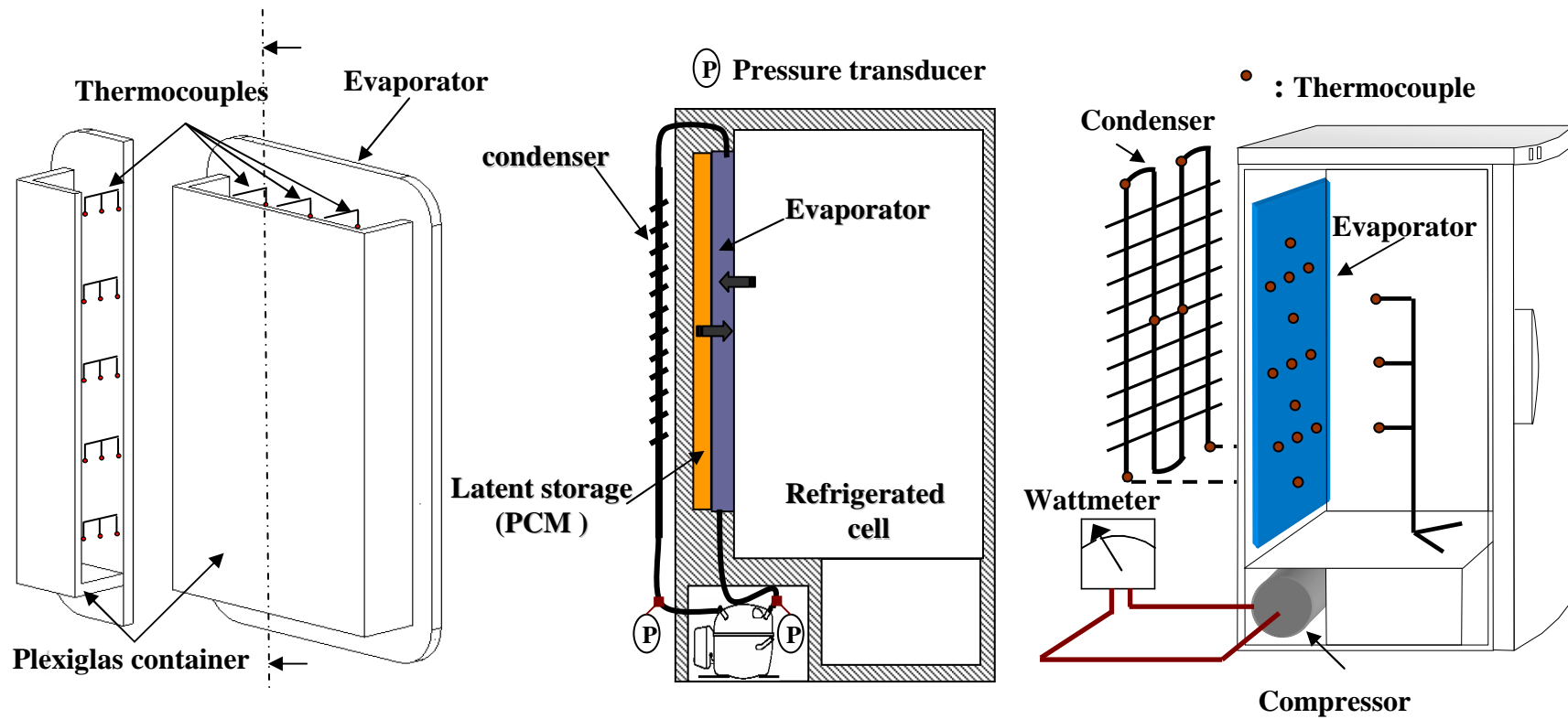
Capteurs



6 compartiments avec robinet

7 – Réalisation expérimentale

Instrumentation du réfrigérateur et du PCM



▶ 7 – Réalisation expérimentale

Essais réalisés

- Ré identification du coefficient moyen de déperditions thermiques des deux réfrigérateurs (utilisation d'un isolant souple + mousse polyuréthane)
- Essais sans PCM
- Essais avec EAU des deux prototypes (5 et 10 mm)
- Essais avec PCM Gélifié [N3: CRISTOPIA] du prototype à 5mm

Experiance	T ext [°C]	R [W]	Q [W]
1	15	0	12,82
2	20	0	19,94
3	25	0	27,06
4	30	0	34,18
5	20	9	28,94
6	20	19	38,94
7	20	29	48,94

▶ 8 – Résultats des Essais

Coefficient moyen de déperditions thermiques

Expérience	K W/m ² K
Sans PCM	0,415
Avec PCM : 5 mm	0,421
Avec PCM : 10 mm	0,422

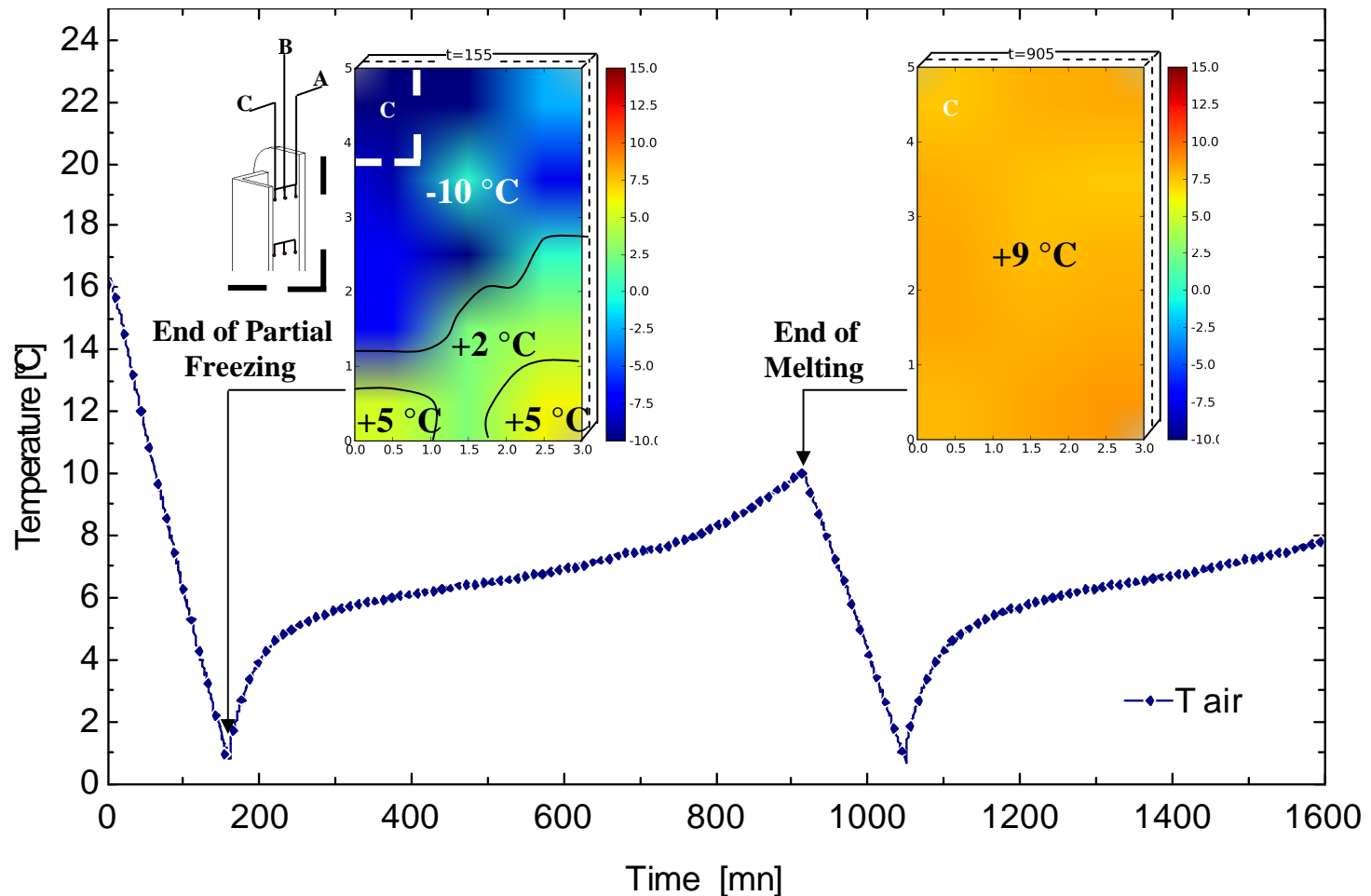
Trois modes de fonctionnement :

- **Solidification partielle** (charges thermiques faibles)
- **Fusion et solidification totale**
- **Fusion partielle** (charges thermiques élevées)

8 – Résultats des Essais : modes de fonctionnement

Température de l'air dans l'enceinte du réfrigérateur et répartition des températures dans le PCM à l'arrêt et au démarrage du compresseur pour un fonctionnement avec PCM partiellement solidifié

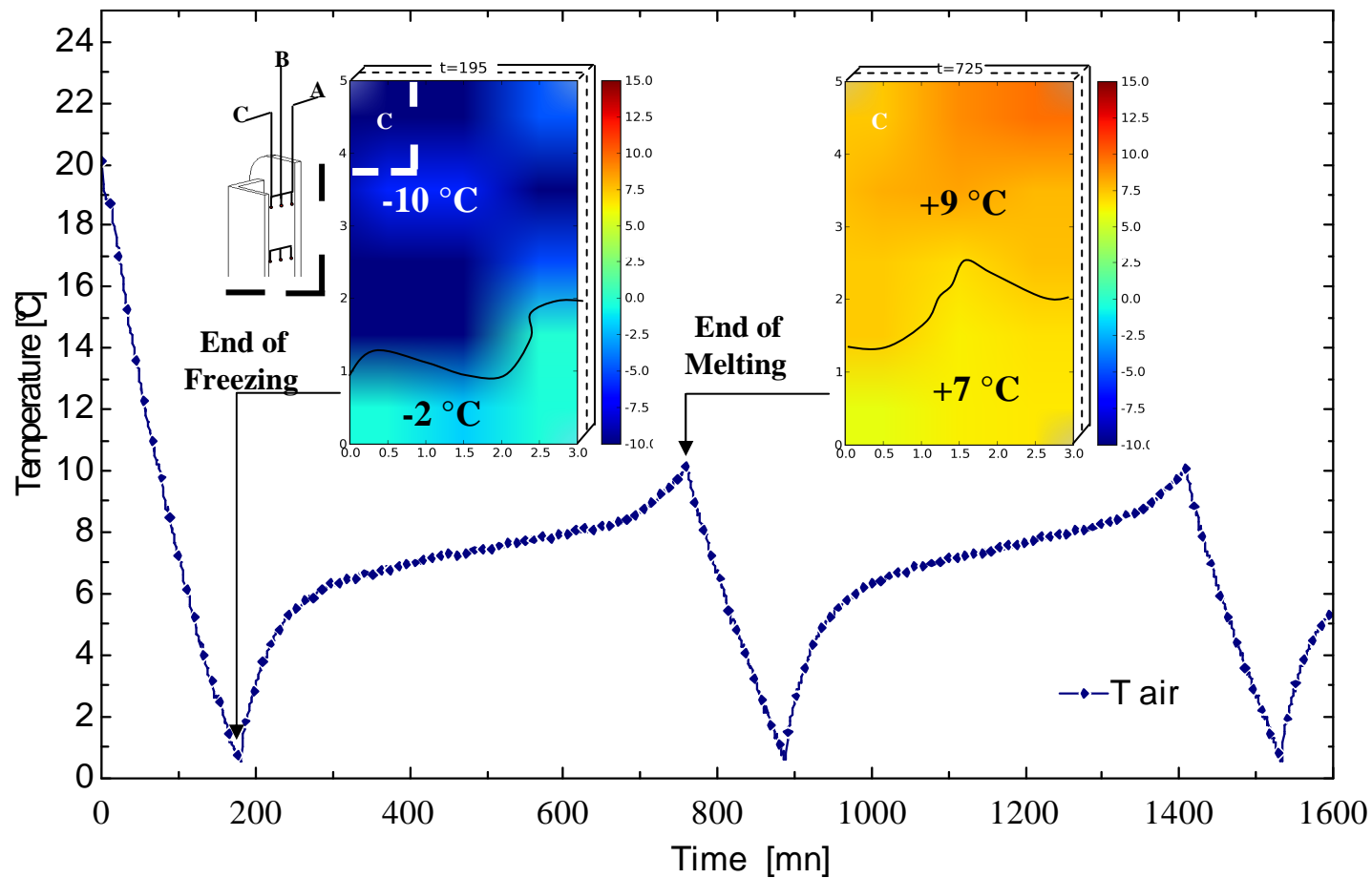
($T_{ext} = 15^\circ\text{C}$, $R = 0\text{W}$, PCM: $T_f = 0^\circ\text{C}$, $e = 5\text{cm}$) (charges thermiques faibles)



8 – Résultats des Essais : modes de fonctionnement

Température de l'air dans l'enceinte du réfrigérateur et répartition des températures dans le PCM à l'arrêt et au démarrage du compresseur pour un fonctionnement avec PCM complètement solidifié puis complètement fondu

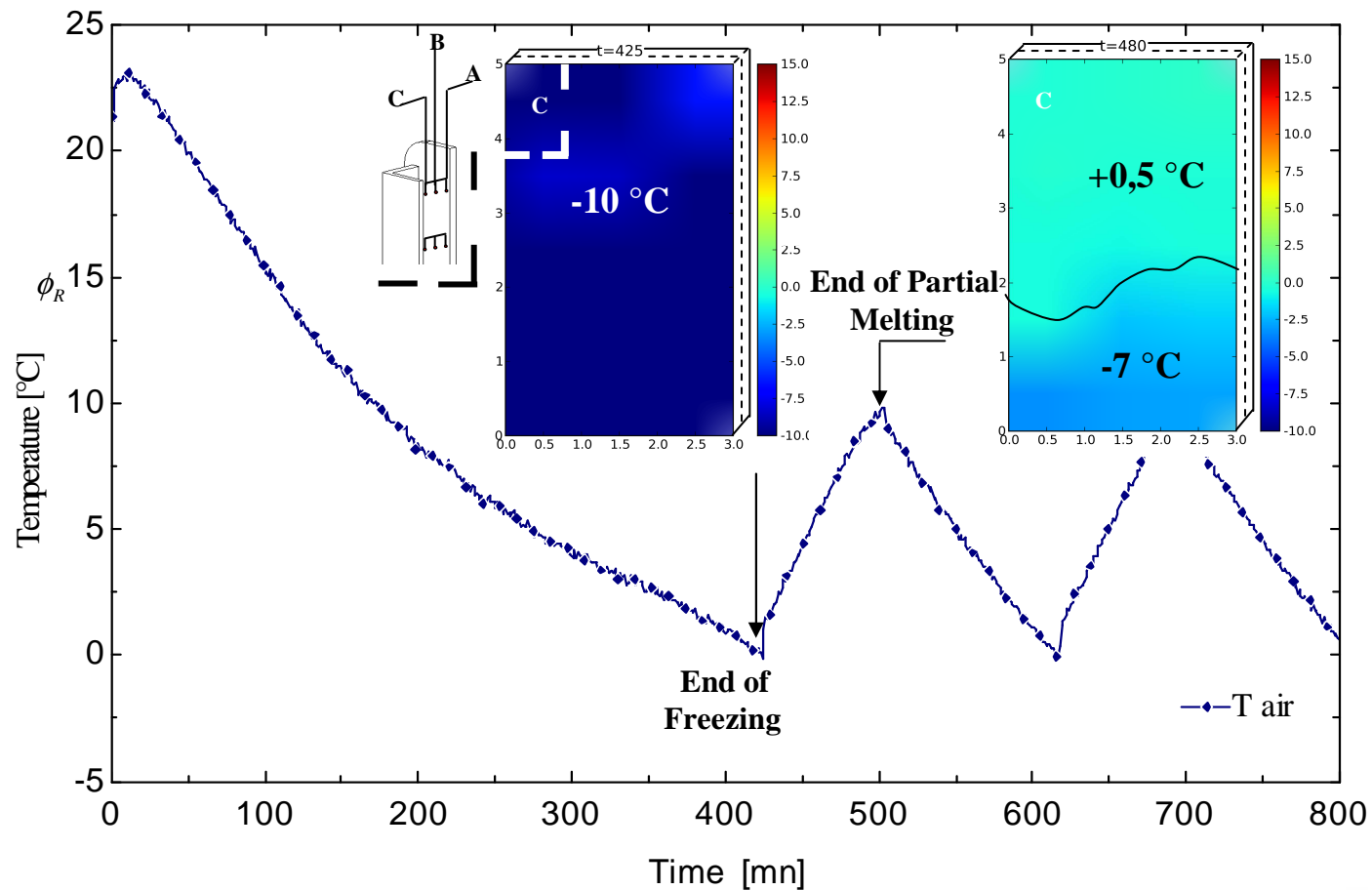
($T_{ext} = 20^{\circ}\text{C}$, $R=0\text{W}$, PCM: $T_f = 0^{\circ}\text{C}$, $e = 5\text{cm}$)



8 – Résultats des Essais : modes de fonctionnement

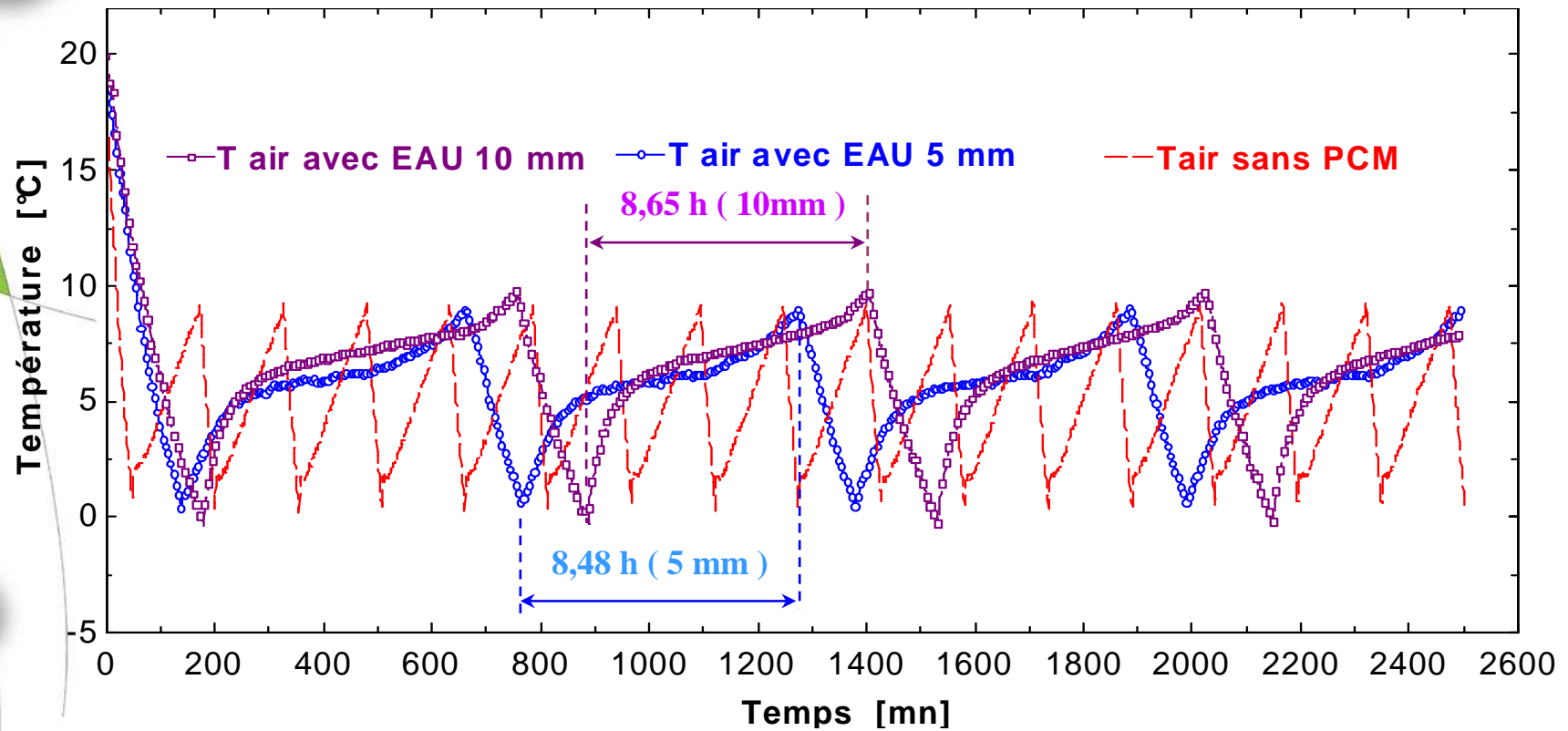
Température de l'air dans l'enceinte du réfrigérateur et répartition des températures dans le PCM à l'arrêt et au démarrage du compresseur pour un fonctionnement avec PCM partiellement fondu

($T_{ext} = 20^\circ\text{C}$, $R = 29\text{W}$, PCM: $T_f = 0^\circ\text{C}$, $e = 5\text{cm}$) (charges thermiques élevées)



8 – Résultats des Essais : Autonomie et températures

évolution de la température de l'air sans PCM, avec EAU 5 et 10 mm
Text = 20°C , R= 0 W



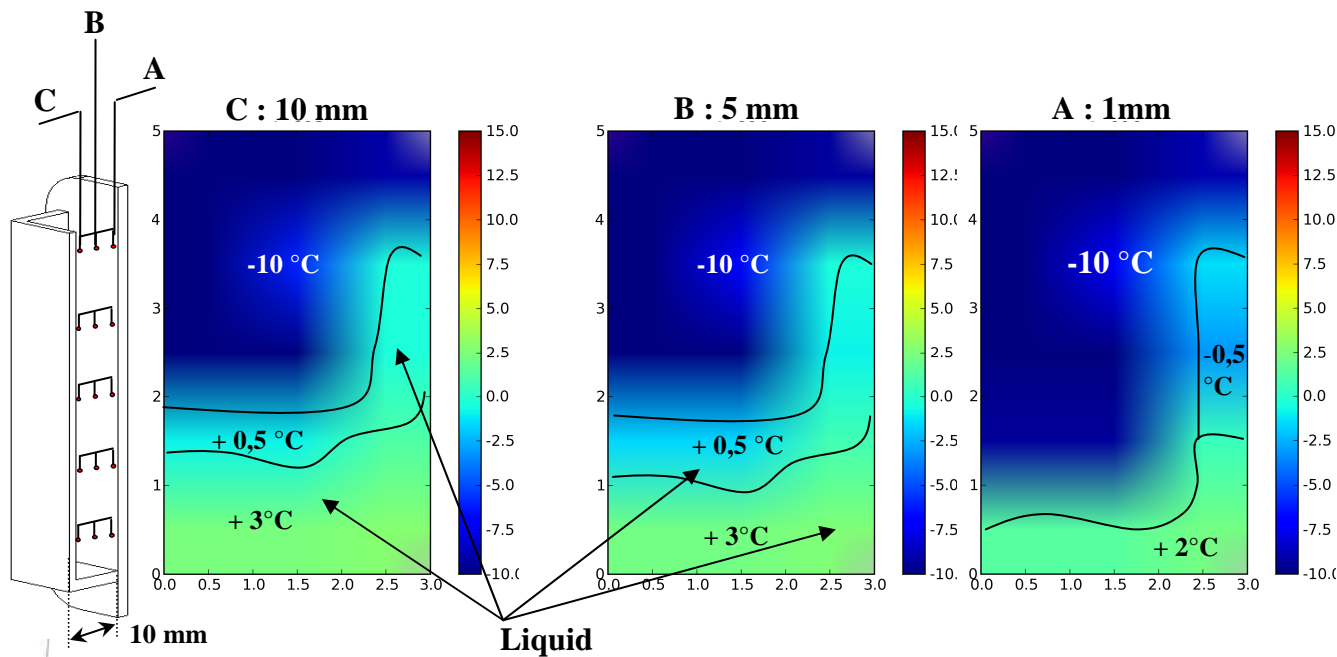
Réduction considérable des fluctuations de température dans l'enceinte réfrigérée

Autonomie presque identique pour 5 mm et 10 mm !

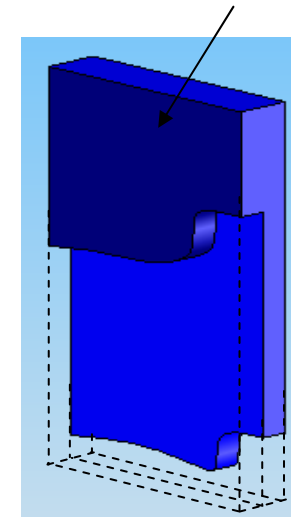
8 – Résultats des Essais

Autonomie presque identique pour 5 mm et 10 mm !

La configuration 10 mm est donc une solidification partielle (on solidifie que 60 % !)

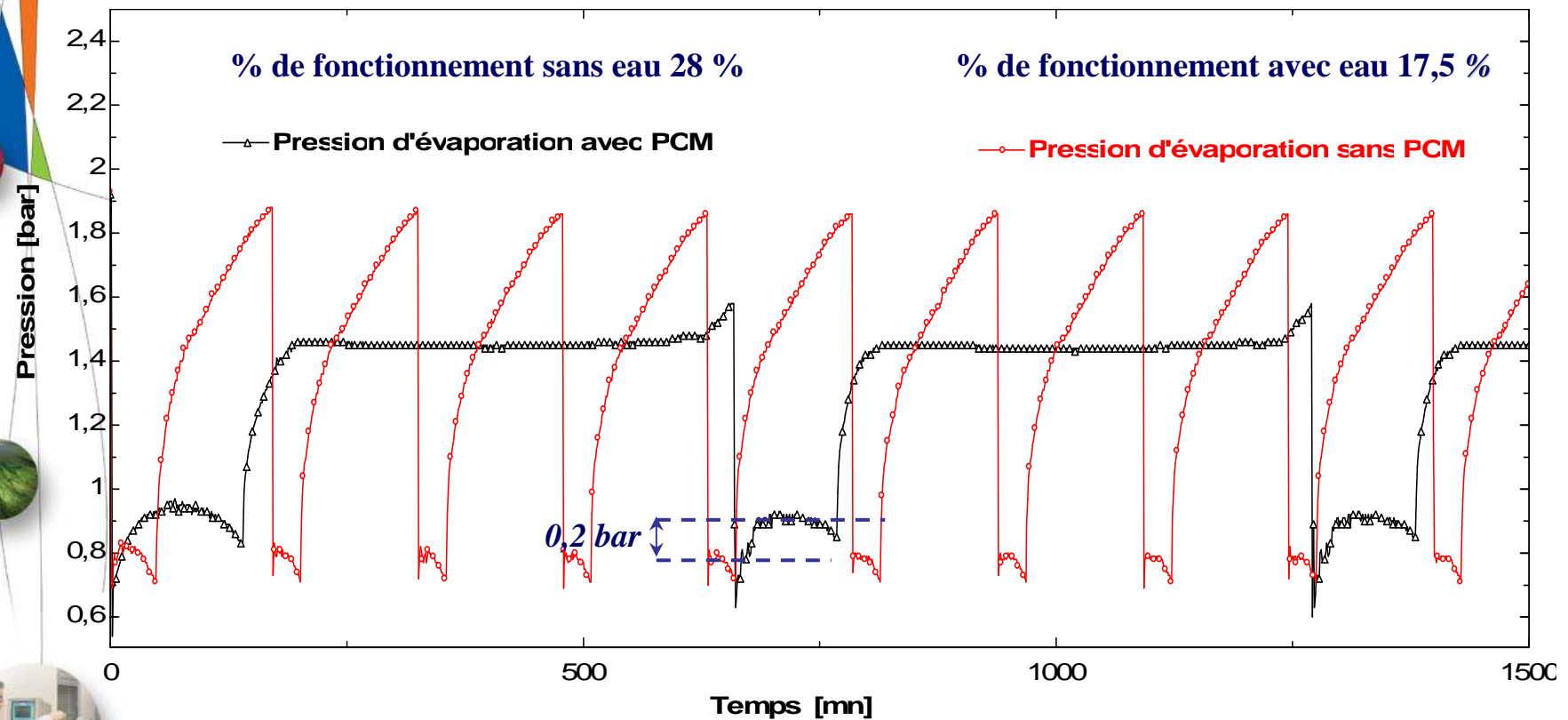


PCM solidifié



8 – Résultats des Essais : Performances

évolution de la pression d'évaporation avec et sans PCM
essai : PCM : eau , épaisseur : 5mm , $T_{ext} = 20^{\circ}C$, $R=0W$



Remontée du niveau d'évaporation de **0,2 bar**

8 – Résultats des Essais

Récapitulatif de l'essai avec eau , épaisseur :5mm , T ext = 20°C , R=0W

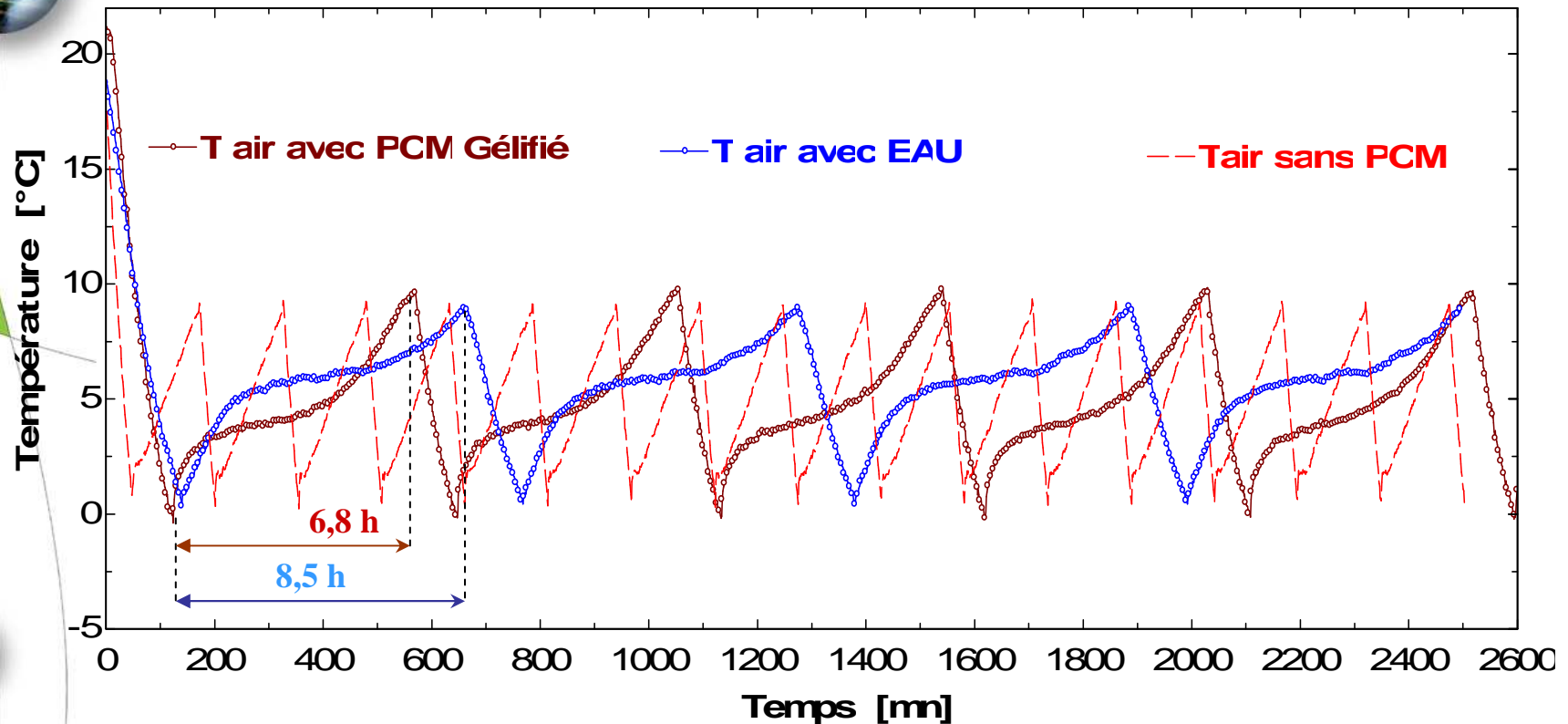
Expérience	T air moyen [°C]	COP	Amélio COP	% Fonct	Autonomie [h]	Pe bar	Te °C	ρ kg/m ³
Sans PCM	5,2	1,67		28,0%	1,58	0,78	-18,3	2,22
Avec PCM 5mm	5,95	2,08	25%	17,5%	<u>8,48</u>	<u>0,98</u>	<u>-12,7</u>	<u>2,76</u>

Explication : Amélioration de performances

On constate que le système fonctionne moins longtemps avec PCM (17% au lieu de 28 %) pour une demande en froid sensiblement identique, ceci s'explique par le fait qu'on produit plus de puissance frigorifique avec PCM

8 – Résultats des Essais

Essais avec PCM Gélifié N3 , épaisseur :5mm , $T_{ext} = 20^{\circ}\text{C}$, $R=0\text{W}$



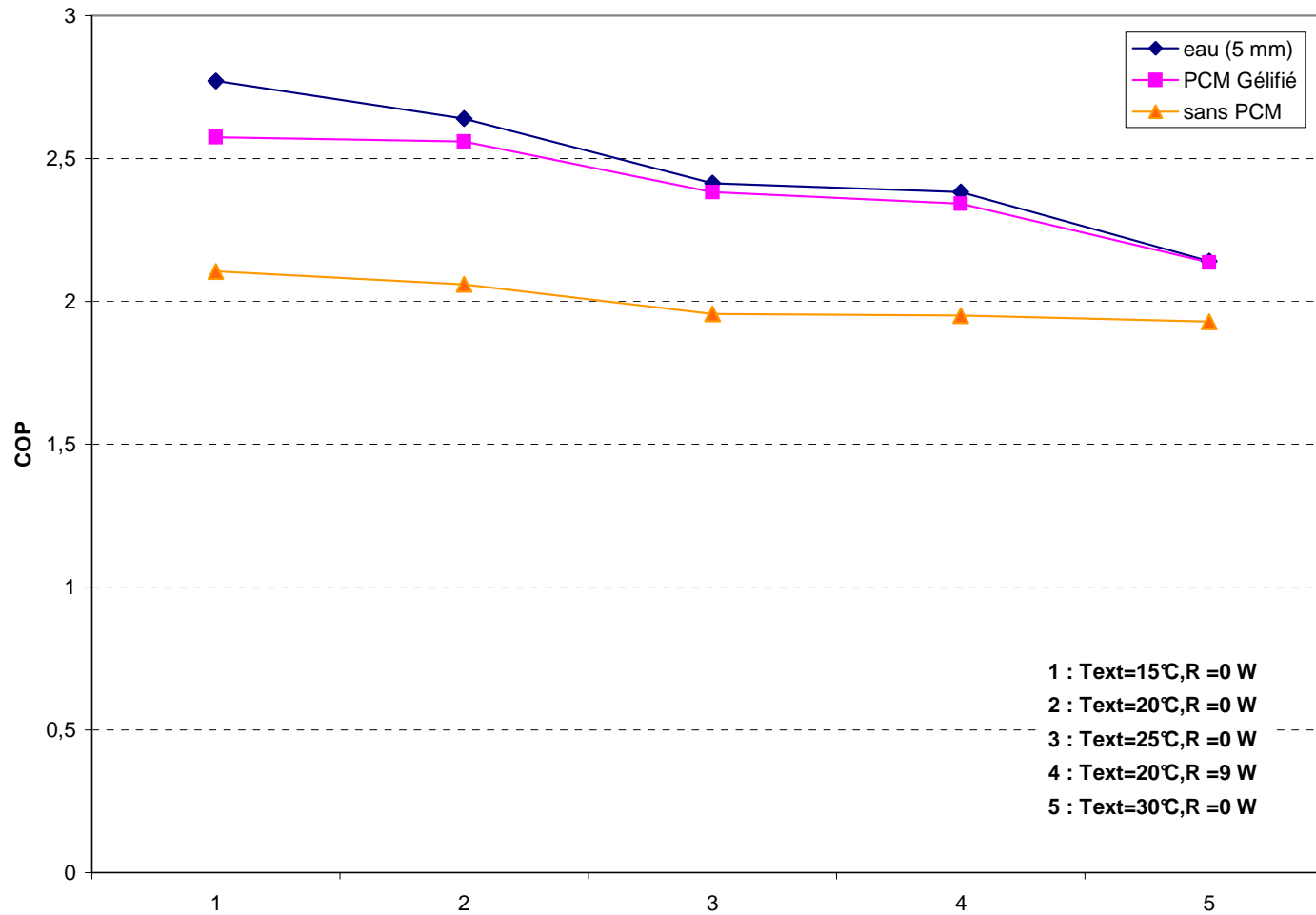
évolution de la température de l'air sans PCM, avec EAU et avec PCM Gélifié

Moins d'autonomie avec le PCM Gélifié , mais une température d'air plus basse dans l'enceinte

Chaleur latente du PCM N3 moins importante que celle de l'eau (295 kJ/kg)

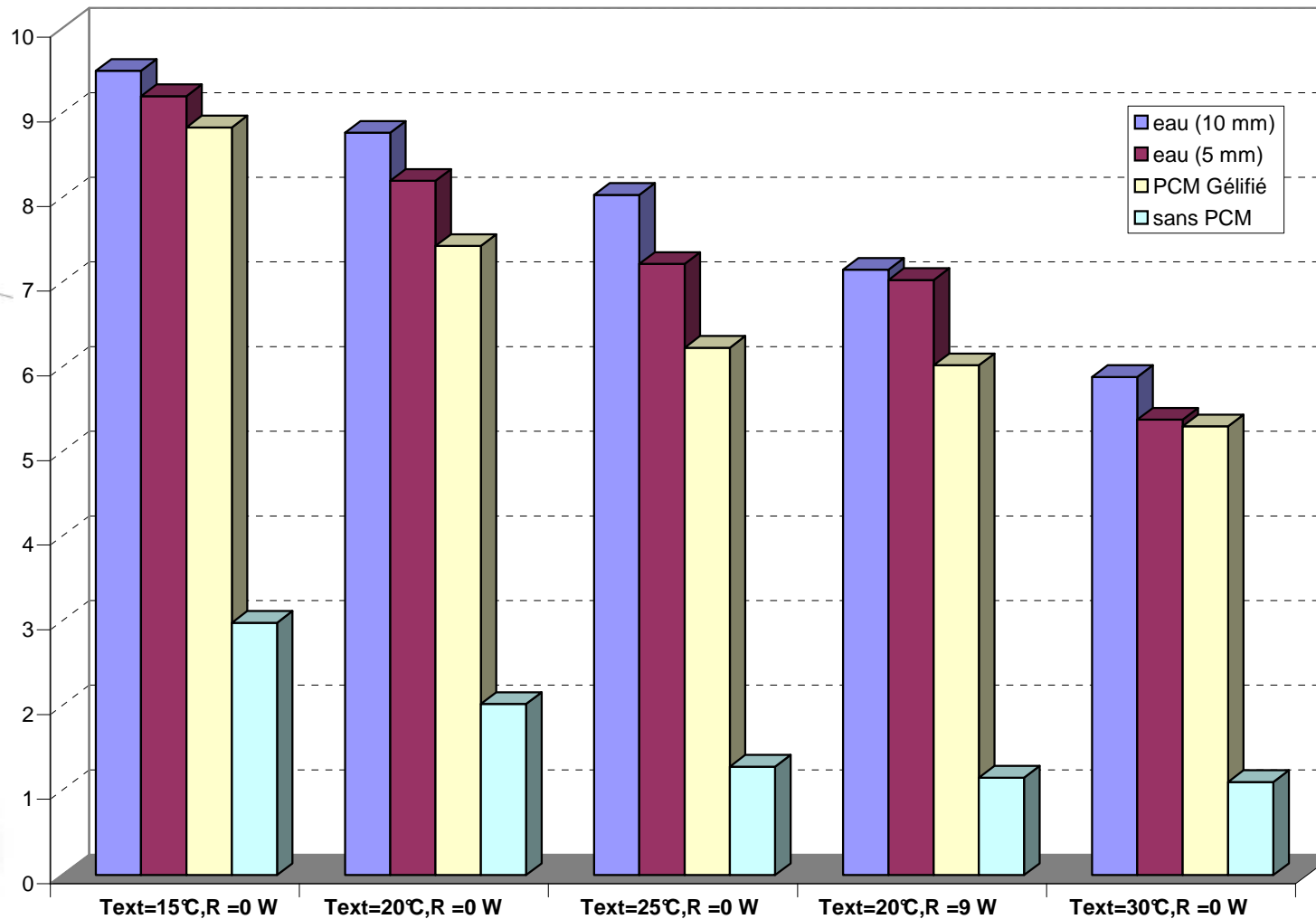
8 – Résultats des Essais : Récapitulatif : COP

COP du système pour différents PCM et différentes charges thermiques



8 – Résultats des Essais : Récapitulatif : Autonomie

Autonomie du système pour différents PCM et différentes charges thermiques



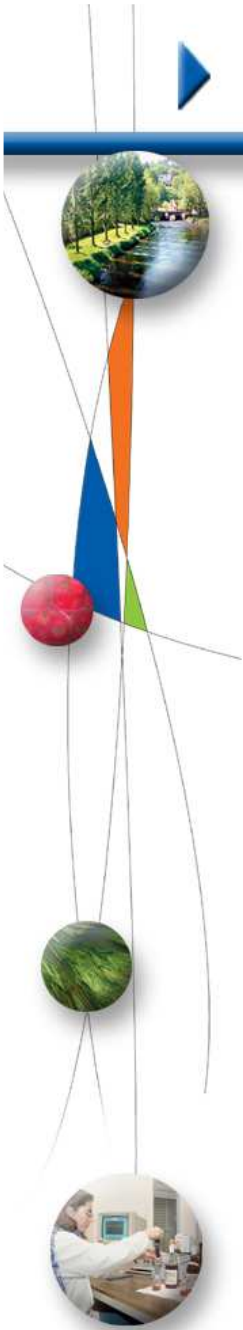
▶ 8 – Conclusion



- ▶ Deux prototypes de réfrigérateur avec PCM ont été conçus et testés pour différentes charges thermiques.
- ▶ Les résultats obtenus avec PCM montrent clairement l'intérêt de l'intégration de cet élément dans un réfrigérateur domestique :
 - L'autonomie du réfrigérateur peut atteindre plus de 8h.
 - Importante réduction des fluctuations de température
 - 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 : Celle-ci est due au phénomène de remplissage progressif de l'évaporateur en frigorigène lors du démarrage



➔ Cette non uniformité est certainement la différence la plus importante entre le modèle numérique actuel et l'expérience



merci de votre attention



2- impact sur la température de l'air :

Réduction considérable des fluctuations de température dans l'enceinte réfrigérée

-sans PCM : T air varie entre 0 et 10 °C

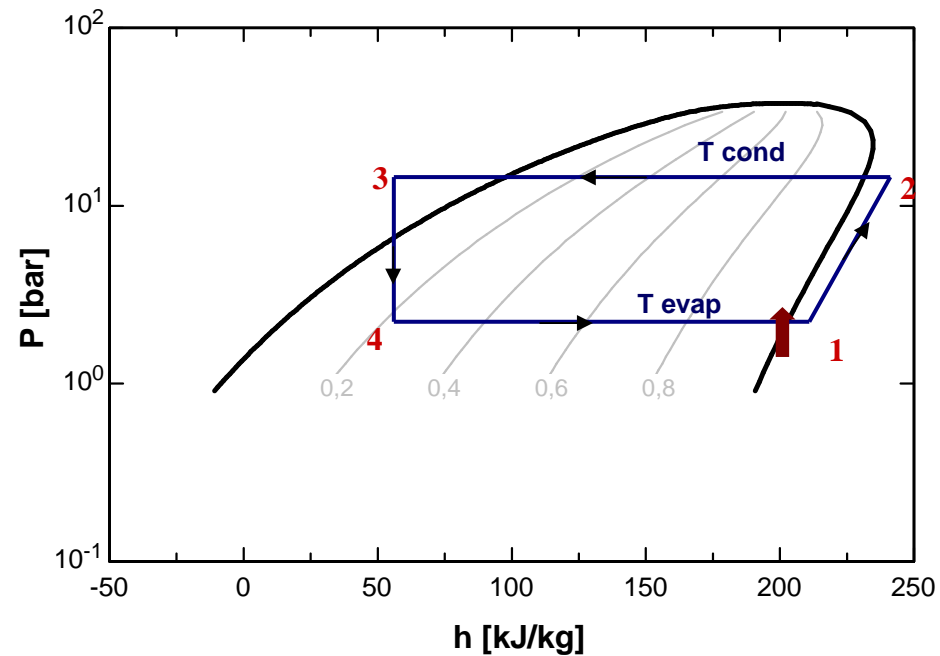
- avec PCM : T air = 6.25°C

Expérience	T ext [°C]	R [W]	Q [W]
1	15	0	12,82
2	20	0	19,94
3	25	0	27,06
4	30	0	34,18
5	20	9	28,94
6	20	19	38,94
7	20	29	48,94

Evolution de la température de l'air avec et sans PCM

2 – Réfrigérateur Domestique Classique

Coefficient de Performance : COP



$$\text{COP} = \frac{\text{Flux de chaleur échangé au niveau de l'évaporateur}}{\text{Puissance consommée par le compresseur}} = \eta_c \frac{T_{\text{evap}}}{T_{\text{cond}} - T_{\text{evap}}}$$

1 – Contexte : Quelques Chiffres

Charge globale dans un foyer vue du réseau

Source : ADEME (campagne de mesure ECODROME)

