

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET  
POPULAIRE MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA  
RECHERCHE SCIENTIFIQUE



Université SAAD DAHLEB – Blida 1  
Faculté de Technologie  
Département Mécanique



Projet de Fin d'Etudes

Pour l'obtention du Diplôme de Master en génie mécanique

**Option : Énergétique**

## Thème

**Intégration de nano-PCM dans un réfrigérateur  
domestique : Amélioration de transfert de chaleur et  
réduction de consommation énergétique**

**Réalisé par :**

DJEMIL Sami

CHITA Fethi

**Encadré par :**

MOKRANE Mehdi

MRB

UDES

Encadreur

BENGHERBIA Nardjes

DOC

USDB

Co-Encadreur

*Année universitaire : 2024/2025*

## REMERCIEMENTS

Tout d'abord, nous exprimons notre profonde gratitude à Dieu Tout-Puissant, qui nous a accordé la volonté, la force et le courage nécessaires pour entreprendre et mener à bien ce travail.

Nous tenons à adresser nos sincères remerciements à notre encadrant, le Dr Mokrane Mahdi, ainsi qu'à notre co-encadrante, le Dr Ben Gharbia Nardjes, pour leur accompagnement précieux, leurs conseils éclairés et leur soutien constant tout au long de cette recherche. Leur rigueur, leur disponibilité et leur confiance, malgré nos connaissances initialement limitées, ont grandement contribué à l'enrichissement et à la réussite de ce travail.

Nous remercions également les membres du jury pour avoir accepté d'évaluer notre mémoire et pour leurs remarques constructives qui ont permis d'améliorer la qualité de ce travail. Nos remerciements vont aussi aux professeurs et au personnel administratif de l'Université de Blida, dont l'aide et le soutien ont été essentiels à la bonne conduite de notre parcours académique.

Enfin, nous exprimons notre reconnaissance à toutes les personnes, proches ou moins proches, qui ont contribué, de près ou de loin, à la réalisation de cette étude.

Merci à tous pour votre soutien.

## **DEDICACE**

*J'ai le grand plaisir de dédier ce modeste travail, comme preuve de respect, de gratitude, et de reconnaissance :*

*À celui qui s'est toujours sacrifié et a attendu patiemment pour me voir réussir à ma chère mère. Puisse Dieu, tout puissant vous combler de santé, de bonheur et vous procurer une longue vie.*

*À celui qui s'est changé la nuit en jour pour m'assurer les bonnes conditions, mon cher père vous avez toujours été une école de patience, de confiance et surtout d'espoir d'amour. Vous êtes et vous resterez pour moi ma référence, la lumière qui illumine mon chemin. Ce travail est le résultat de l'esprit de sacrifice dont vous avez fait preuve. J'implore Dieu, tout puissant de vous accorder une bonne santé, une longue vie et beaucoup de bonheur.*

*À mon binôme Sami qui a toujours été présente dans les moments difficiles.*

*Une spéciale dédicace à mon encadrant Dr. Mokrane Mahdi qui nous a très bien orientés. Il nous a appris beaucoup de choses, sans lui le travail n'aurait jamais pris fin. et co-encadrant, Dr Ben Gharbia*

***Chita Fethi.***

## **DEDICACE**

*J'ai le grand plaisir de dédier ce modeste travail, comme preuve de respect, de gratitude, et de reconnaissance :*

*À celui qui s'est toujours sacrifié et a attendu patiemment pour me voir réussir à ma chère mère. Puisse Dieu, tout puissant vous combler de santé, de bonheur et vous procurer une longue vie.*

*À celui qui s'est changé la nuit en jour pour m'assurer les bonnes conditions, mon cher père vous avez toujours été une école de patience, de confiance et surtout d'espoir d'amour. Vous êtes et vous resterez pour moi ma référence, la lumière qui illumine mon chemin. Ce travail est le résultat de l'esprit de sacrifice dont vous avez fait preuve. J'implore Dieu, tout puissant de vous accorder une bonne santé, une longue vie et beaucoup de bonheur.*

*Également ma grand-mère ma raison de vivre la bougie qui allume ma vie*

*À mon binôme Fethi et mon encadrant Dr. Mokrane Mahdi et Co-encadrant, Dr Bengharbia qui sont toujours été présente dans les moments difficiles.*

*Une spéciale dédicace à mes amis Saleh mon bras droit Redha, Nayla , Jayjay , yasser , sidoooo qui sont mes alliés*

**Djemil Sami.**

## ملخص

يركز هذا البحث على تحسين كفاءة الطاقة في أنظمة التبريد، التي تعتبر ضرورية لحفظ الأغذية وتكييف. يتناول دمج مواد تغير الطور (PCM) ومشتقاتها المحسنة بجزيئات نانوية (nano-PCM) في ثلاجة منزلية. تجمع الدراسة بين منهج نظري يستعرض المبادئ الديناميكية الحرارية ودورات التبريد، ومنهج تجريبي يشمل محاكاة رقمية باستخدام برنامج ANSYS Fluent واختبارات عملية على فريزر. تساعد مواد تغير الطور ونسخها النانوية على تثبيت درجة الحرارة الداخلية وتقليل تكرار تشغيل وإيقاف الضاغط، مما يخفض استهلاك الطاقة. تظهر النتائج أن إضافة الجزيئات النانوية تحسن التوصيل الحراري، استقرار النظام، والكفاءة العامة. تشمل التحليلات درجة الحرارة، استهلاك الكهرباء، الحرارة المخزنة، والتنظيم الحراري. يبرز هذا العمل إمكانيات المواد النانوية لتحسين أداء الطاقة لمعدات التبريد وتقليل تأثيرها البيئي، ويفتح آفاقاً لأبحاث مستقبلية في تحسين المواد والتصاميم للتطبيقات الصناعية والمنزلية.

**الكلمات المفتاحية:** النقل / مواد تغيير الطور (PCM) / الجسيمات النانوية / التوصيل

## Résumé

Ce mémoire s'inscrit dans la dynamique d'amélioration de l'efficacité énergétique des systèmes frigorifiques, essentiels pour la conservation alimentaire et la climatisation. Il traite de l'intégration des matériaux à changement de phase (PCM) et de leurs dérivés enrichis en nanoparticules (nano-PCM) dans un réfrigérateur domestique. L'étude combine une approche théorique, à travers une revue des principes thermodynamiques et des cycles frigorifiques, et une approche expérimentale, incluant des simulations numériques sous ANSYS Fluent et des essais pratiques sur un congélateur. Les PCM et nano-PCM permettent de stabiliser la température interne et de réduire la fréquence des cycles marche/arrêt du compresseur, ce qui diminue la consommation énergétique. Les résultats montrent que l'ajout de nano-PCM améliore la conductivité thermique, la stabilité et l'efficacité globale du système. L'analyse porte sur la température, la consommation électrique, la chaleur stockée et la régulation thermique. Ce travail met en évidence le potentiel des nano-PCM pour optimiser la performance énergétique des équipements frigorifiques et réduire leur impact environnemental. Il ouvre aussi la voie à de futures recherches sur l'optimisation des matériaux et des configurations pour des applications industrielles et domestiques.

**Mots clés :** Transfert / Matériaux à changement de phase (PCM) / Nanoparticules / Conduction

## **Abstract**

This thesis focuses on improving the energy efficiency of refrigeration systems, which are essential for food preservation and thermal comfort. It addresses the integration of phase change materials (PCM) and their nanoparticle-enhanced derivatives (nano-PCM) into a domestic refrigerator. The study combines a theoretical approach, reviewing thermodynamic principles and refrigeration cycles, with an experimental approach including numerical simulations using ANSYS Fluent and practical tests on a freezer. PCMs and nano-PCMs help stabilize internal temperature and reduce the compressor's on/off cycling frequency, thereby lowering energy consumption. Results show that adding nano-PCMs improves thermal conductivity, system stability, and overall efficiency. The analysis covers temperature, electrical consumption, stored heat, and thermal regulation. This work highlights the potential of nano-PCMs to optimize the energy performance of refrigeration equipment and reduce their environmental impact. It also paves the way for future research on optimizing materials and configurations for industrial and domestic applications.

**Keywords:** Transport / Phase Change Materials (PCM) / Nanoparticles / Conduction

# Table des matières

Résumé .....	6
Liste des symboles.....	12
Liste des tableaux .....	16
INTRODUCTION GENERAL .....	17
CHAPITRE 1 .....	21
I.1 Installation Frigorifique : .....	22
I.2 Principe De Fonctionnement : .....	22
I.3 Composent De Machine Frigorifique : .....	23
I.3.1 Compresseur : .....	23
I.3.2 Condenseur : .....	24
I.3.3 Détendeur : .....	25
I.3.4 Évaporateur : .....	26
I.4 Cycle Frigorifique : .....	26
I.4.1 Cycle Thermodynamique : .....	27
I.4.2 Diagramme Entropique T-S : .....	27
I.4.3 Cycle de Carnot : .....	29
I.4.4. Diagramme de Clapeyron : .....	31
I.5 Fluide Frigorigène : .....	32
I.5.1 Propriétés du fluide frigorigène : .....	32
I.5.2 Catégories du fluide frigorigène : .....	33
I.5.3 Réglementations: .....	35
I.6 Fluide Frigorigène Natural : .....	35
I.6.1 L'eau ou R718 : .....	36
I.6.2 CO2 ou R744 : .....	36
I.6.3 L'ammoniac (NH3 ou R717) : .....	36

<b>I.6.4</b>	<b>Fluide R600a :</b>	<b>37</b>
<b>I.7</b>	<b>Conclusion :</b>	<b>37</b>
<b>CHAPITRE 2</b>		<b>38</b>
<b>II.1</b>	<b>Matériaux à changement de phase (PCM) :</b>	<b>39</b>
<b>II.2</b>	<b>Différents types de PCM :</b>	<b>40</b>
<b>II.2.1</b>	<b>PCM organique :</b>	<b>40</b>
<b>II.2.2</b>	<b>PCM inorganique :</b>	<b>40</b>
<b>II.2.3</b>	<b>Différence entre PCM inorganique et PCM inorganique :</b>	<b>40</b>
<b>II.3.1</b>	<b>Avantage :</b>	<b>42</b>
<b>II.3.2</b>	<b>Inconvénient :</b>	<b>42</b>
<b>II.4</b>	<b>Chaleur latent :</b>	<b>42</b>
<b>II.4.1</b>	<b>Stockage par chaleur latente :</b>	<b>43</b>
<b>II.4.2</b>	<b>Le changement de phase d'un point de vue énergétique :</b>	<b>44</b>
<b>II.5</b>	<b>Caractéristiques de PCM :</b>	<b>45</b>
<b>II.6</b>	<b>Applications des PCM dans les équipements frigorifiques :</b>	<b>46</b>
<b>II.6.1.</b>	<b>Réfrigérateur domestique :</b>	<b>46</b>
<b>II.6.2</b>	<b>Transports frigorifiques :</b>	<b>47</b>
<b>II.6.3</b>	<b>Meubles frigorifiques de vents :</b>	<b>48</b>
<b>II.7</b>	<b>Nanoparticule :</b>	<b>49</b>
<b>II.7.1.</b>	<b>Type de Nanoparticule :</b>	<b>49</b>
<b>II.8</b>	<b>Matériaux à changement de phase -Nanoparticule (Nano PCM) :</b>	<b>51</b>
<b>II.9</b>	<b>Caractéristiques de nano PCM :</b>	<b>52</b>
<b>II.10</b>	<b>Intégration des (PCM) et des nano-PCM dans les réfrigérateurs :</b>	<b>52</b>
<b>II.11</b>	<b>Simulation Numérique :</b>	<b>53</b>
<b>II.12.</b>	<b>Méthodologie outils utilisé :</b>	<b>54</b>
		<b>56</b>
<b>II.13</b>	<b>Conclusion :</b>	<b>56</b>

CHAPITRE 3 .....	57
<b>III.1 Partie numérique :</b> .....	<b>58</b>
<b>III.1.1 Présentation du modèle géométrique :</b> .....	<b>58</b>
<b>III.1.2 Génération et qualité du maillage :</b> .....	<b>59</b>
<b>III.1.3 Paramétrage initial de la simulation sous ANSYS Fluent :</b> .....	<b>60</b>
<b>III.1.4 Configuration générale des paramètres physiques dans ANSYS Fluent...</b>	<b>61</b>
<b>III.1.5 Activation des modèles physiques dans ANSYS Fluent :</b> .....	<b>62</b>
<b>III.1.6 Définition des matériaux et de leurs propriétés physiques :</b> .....	<b>63</b>
<b>III.1.7 Définition des conditions aux limites thermiques :</b> .....	<b>64</b>
<b>III.1.8 Configuration des méthodes de solution :</b> .....	<b>65</b>
<b>III.1.9 Initialisation de la Solution</b> .....	<b>66</b>
<b>III.1.10 Lancement du Calcul :</b> .....	<b>67</b>
<b>III.2 Partie expérimentale :</b> .....	<b>68</b>
<b>III.2.1 Présentation du site expérimental – La maison solaire de l’UDES: .....</b>	<b>68</b>
<b>III.2.2 Description de dispositif expérimentale :</b> .....	<b>69</b>
<b>III.2.3 Matérielle et mesure:.....</b>	<b>72</b>
<b>III.2.4 Emplacement du PCM dans le congélateur :</b> .....	<b>75</b>
<b>III.2.5 Procédure d’expérimentation :</b> .....	<b>76</b>
<b>III.2.6 Emplacement des thermocouples :</b> .....	<b>77</b>
<b>III.2.7 Préparation de nano PCM:.....</b>	<b>79</b>
<b>III.3 Conclusion :</b> .....	<b>82</b>
CHAPITRE 4 .....	83
<b>IV.1 Résultats numérique :</b> .....	<b>84</b>
<b>IV.1.1 Profils de température à t = 0 s :</b> .....	<b>84</b>
<b>IV.1.2 Profils de tempaérature à t = 20 s :</b> .....	<b>86</b>
<b>IV.1.4 Profils de température à t = 60 s :</b> .....	<b>89</b>
<b>IV.1.5 Profils de température à t = 80 s :</b> .....	<b>91</b>

<b>IV.1.6 Profils de température à t = 100 s :</b>	<b>93</b>
<b>IV.2 Partie expérimentale :</b>	<b>95</b>
<b>IV.2.1 Analyse des cycles de fonctionnement du compresseur dans un réfrigérateur vide (sans PCM) :</b>	<b>96</b>
<b>IV.2.2 Impact du PCM sur le refroidissement initial :</b>	<b>98</b>
<b>IV.2.3 Effet du nanoPCM (TiO<sub>2</sub>) sur la performance thermique du réfrigérateur :</b>	<b>100</b>
<b>IV.2.4 Analyse Comparative de la Performance Thermique : Sans PCM, Avec PCM et Avec NanoPCM (TiO<sub>2</sub>) :</b>	<b>101</b>
<b>IV.2.5 Optimisation de la consommation électrique du réfrigérateur par l'intégration de PCM et nanoPCM :</b>	<b>103</b>
<b>IV.2.6 Analyse technico-économique appliquée au champ photovoltaïque de l'UDES :</b>	<b>104</b>
<b>IV.3 Conclusion :</b>	<b>107</b>
<b>CONCLUSION GÉNÉRALE</b>	<b>108</b>
<b>REFERENCE:</b>	<b>110</b>

## Liste des symboles

m	Masse	kg
Q	Quantité d'énergie échangée	J
L <sub>ch</sub>	Chaleur latente de changement d'état	J/kg
C <sub>pl</sub>	Capacité calorifique massique à l'état liquide	J/kg·K
C <sub>ps</sub>	Capacité calorifique massique à l'état solide	J/kg·K
T <sub>1</sub>	Température initiale du liquide	K
T <sub>2</sub>	Température finale après solidification	K
ρ	Masse volumique	kg/m <sup>3</sup>
k	Conductivité thermique	W/m·K
H	Hauteur du compartiment (dans le modèle géométrique)	cm
L	Largeur du compartiment (dans le modèle géométrique)	cm
E	Épaisseur du compartiment (dans le modèle géométrique)	cm

## Liste des figures

Figure 1. Schéma d'installation d'une machine frigorifique. ....	23
Figure 2. Compresseur frigorifique .....	24
Figure 3. Schéma de Condenseur .....	25
Figure 4. Schéma d'évaporateur .....	26
Figure 5. Description d'une installation frigorifique .....	27
Figure 6. Diagramme T-S.....	29
Figure 7. Schéma d'une installation frigorifique.....	29
Figure 8. Cycle de Carnot .....	30
Figure 9. Cycle de Mollier .....	31
Figure 10. Cycle de Clapeyron .....	31
Figure 11. Matériau à changement de phase .....	39
Figure 12. Stockage de l'énergie. ....	44
Figure 13. Décharge de l'énergie. ....	44
Figure 14. Comportement thermique et cinétique d'un corps pur idéal lors de la solidification [40] .....	45
Figure 15. Nanoparticule .....	49
Figure 16. Nanoparticules métalliques .....	50
Figure 17. Nanoparticules d'oxyde métallique .....	50
Figure 18. Nanotubes de carbone (NTC) .....	51
Figure 19. Fonctionnement du logiciel :.....	56
Figure 20. Schéma de la configuration géométrique du congélateur avec intégration du PCM..	59
Figure 21. Maillage du domaine de simulation montrant un raffinement accru à l'interface PCM .....	60
Figure 22. Fenêtre de lancement de Fluent dans ANSYS pour le paramétrage de la simulation	61
Figure 23. Fenêtre de configuration générale des paramètres physiques et numériques dans ANSYS Fluent.....	62
Figure 24. Fenêtre de sélection des modèles physiques dans ANSYS Fluent (activation de Energy et SOLIDIFICATION & MELTING) .....	63
Figure 25. Fenêtre de création et d'édition des matériaux dans ANSYS Fluent (exemple pour le PCM).....	64
Figure 26. Fenêtre de définition des conditions aux limites thermiques dans ANSYS Fluent ....	65
Figure 27. Paramètres de la méthode de solution dans ANSYS Fluent.....	66

Figure 28. Paramètres d'initialisation de la solution dans ANSYS Fluent. ....	67
Figure 29. Paramètres de lancement du calcul transitoire dans ANSYS Fluent. ....	68
Figure 30. Photo de la maison solaire : (a) extérieur, (b) intérieur. ....	69
Figure 31. Photo d'un réfrigérateur domestique. ....	70
Figure 32. Compartiment congélateur. ....	70
Figure 33. Photo évaporateur à ailette avec ventilation :(a) Evaporateur, (b) Ventilateur. ....	71
Figure 34. Compresseur du réfrigérateur. ....	71
Figure 35. Photo de thermocouple. [40] ....	72
Figure 36. Photos du Data Logger type Hydra 2700 ....	72
Figure 37. Interface graphique du data logger. ....	74
Figure 38. Photo de compteur électrique utilisée. ....	74
Figure 39. Emplacement des matériaux à changement de phase (PCM) à l'intérieur du congélateur .....	76
Figure 40. Vue du banc d'essai utilisé pour étudier le comportement thermique et la régulation du réfrigérateur domestique ....	77
Figure 41. Photo des thermocouples installés dans le réfrigérateur ....	79
Figure 42. Préparation des nanoPCM en utilisant la méthode en deux étapes. ....	81
Figure 43. Profils de température à l'instant initial ( $t = 0$ s) dans un PCM avec différentes concentrations volumiques de nanoparticules de $TiO_2$ (0 %, 1 %, 3 % et 5 %). ....	85
Figure 44. Profils de température à l'instant ( $t = 20$ s) dans un PCM avec différentes concentrations volumiques de nanoparticules de $TiO_2$ (0 %, 1 %, 3 % et 5 %). ....	87
Figure 45. Profils de température à l'instant ( $t = 40$ s) dans un PCM avec différentes concentrations volumiques de nanoparticules de $TiO_2$ (0 %, 1 %, 3 % et 5 %). ....	89
Figure 46. Profils de température à l'instant ( $t = 60$ s) dans un PCM avec différentes concentrations volumiques de nanoparticules de $TiO_2$ (0 %, 1 %, 3 % et 5 %). ....	91
Figure 47. Profils de température à l'instant ( $t = 80$ s) dans un PCM avec différentes concentrations volumiques de nanoparticules de $TiO_2$ (0 %, 1 %, 3 % et 5 %). ....	93
Figure 48. Profils de température à l'instant finale ( $t = 100$ s) dans un PCM avec différentes concentrations volumiques de nanoparticules de $TiO_2$ (0 %, 1 %, 3 % et 5 %). ....	95
Figure 49. Évolution de la température dans un congélateur : phase de démarrage et cycles ON/OFF du compresseur. ....	97
Figure 50. Cycle frigorifique et régulation thermique par cycles ON/OFF du compresseur dans un réfrigérateur vide. ....	97

Figure 51. Comparaison de l'évolution thermique d'un réfrigérateur à vide.....	99
Figure 52. Évolution du temps d'arrêt du compresseur (toff) d'un réfrigérateur avec et sans PCM .....	100
Figure 53. Comparaison de la température dans un réfrigérateur sans et avec nanoPCM .....	101
Figure 54. Comparaison des performances thermiques de réfrigérateur : Sans PCM, Avec PCM et Avec nanoPCM.....	102
Figure 55. Comparaison de la consommation électrique quotidienne du réfrigérateur : Sans PCM, Avec PCM et Avec nanoPCM.....	104
Figure 56. Économies d'énergie annuelles du Réfrigérateur .....	105
Figure 57. Impact du PCM et du nanoPCM sur la part relative de la consommation du réfrigérateur dans la production PV annuelle.....	106

## Liste des tableaux

Tableau 1. Fluide frigorigène CFC .....	33
Tableau 2. Fluide frigorigène HCFC .....	34
Tableau 3. Fluide frigorigène HFC.....	35
Tableau 4. Dimensions géométriques des différentes parties du modèle .....	59
Tableau 5. Propriétés physiques des matériaux utilisés dans la simulation .....	64
Tableau 6. Descriptions des différents types de thermocouple .....	73
Tableau 7. Emplacement de thermocouple .....	77
Tableau 8. Propriété de nanoparticule du TiO <sub>2</sub> .....	80

## INTRODUCTION GENERAL

L'évolution constante des besoins en réfrigération, qu'ils soient domestiques, industriels ou commerciaux, impose aujourd'hui le développement de systèmes de plus en plus performants, efficaces et respectueux de l'environnement. Au cœur de ces enjeux, les installations frigorifiques jouent un rôle essentiel dans la conservation des produits alimentaires, la chaîne du froid pharmaceutique, ainsi que dans le maintien du confort thermique. Cependant, les systèmes traditionnels de réfrigération, bien que largement répandus, présentent encore des limites importantes, notamment en termes de consommation énergétique, de performance thermique et d'impact environnemental.

Face à ces défis, la recherche scientifique s'oriente de plus en plus vers des technologies innovantes visant à améliorer l'efficacité énergétique des équipements frigorifiques. Parmi ces solutions, l'intégration des matériaux à changement de phase (PCM) et de leurs dérivés enrichis en nanoparticules (nano-PCM) s'impose comme une approche prometteuse. Ces matériaux permettent non seulement de stabiliser la température interne des systèmes frigorifiques, mais aussi de réduire la fréquence des cycles marche/arrêt des compresseurs, contribuant ainsi à une diminution significative de la consommation énergétique.

Cette thèse s'inscrit dans cette dynamique technologique et scientifique. Des études similaires ont déjà été menées, notamment sur les matériaux à changement de phase, tels que le propylène glycol à 30 % [1] et les paraffines [2], ainsi que sur les acides gras [3]. Toutes ces études visent à améliorer l'efficacité énergétique des équipements de réfrigération. Cette recherche vise à étudier les matériaux à changement de phase, en complément d'une étude récente elle est l'intégration des nanoparticule dans le PCM, à analyser les propriétés thermiques des matériaux PCM et nano-PCM et à évaluer leur impact sur la performance énergétique. Par une double approche – théorique et expérimentale – basée notamment sur des simulations numériques réalisées avec le logiciel ANSYS Fluent et l'application d'un banc d'essai expérimental, cette recherche explore l'impact pratique de l'intégration de ces matériaux sur le comportement thermique et énergétique d'un réfrigérateur domestique.

L'objectif est donc double : d'une part, comprendre les mécanismes thermodynamiques fondamentaux des installations frigorifiques et des matériaux utilisés ; d'autre part, proposer des améliorations concrètes et scientifiquement validées pour optimiser les performances de réfrigération tout en réduisant leur empreinte énergétique et environnementale. Ce document s'articule en gros comme suit :

**Chapitre 1 : Introduction à la thématique et présentation du cycle frigorifique**

Ce premier chapitre pose les bases de l'étude en introduisant le contexte général de la réfrigération et ses enjeux actuels, notamment en termes de performance énergétique et d'impact environnemental. Il présente ensuite le fonctionnement du cycle frigorifique classique, en expliquant les principes thermodynamiques fondamentaux, les composants clés (compresseur, condenseur, évaporateur, détendeur) et les phénomènes physiques impliqués. Cette introduction permet de comprendre les limites des systèmes traditionnels et justifie l'intérêt d'intégrer des solutions innovantes telles que les matériaux à changement de phase.

## **Chapitre 2 : Définition des matériaux à changement de phase (PCM), intégration des nanoparticules et explication de leur fonctionnement**

Ce chapitre est consacré à l'étude approfondie des matériaux à changement de phase (PCM). Il décrit leurs propriétés thermiques spécifiques, leur capacité à stocker et libérer de l'énergie thermique lors des transitions de phase, et leur rôle dans la stabilisation thermique des systèmes frigorifiques. L'intégration des nanoparticules dans ces matériaux (nano-PCM) est également abordée, en mettant en lumière les améliorations apportées, notamment en termes de conductivité thermique et de stabilité. Ce chapitre détaille les mécanismes physiques et chimiques qui sous-tendent ces améliorations, ainsi que les critères de sélection des matériaux pour une application optimale dans les systèmes de réfrigération.

## **Chapitre 3 : Partie expérimentale – simulations numériques avec ANSYS Fluent et essais sur congélateur**

Ce chapitre présente la démarche expérimentale adoptée pour évaluer l'impact des PCM et nano-PCM sur les performances thermiques et énergétiques d'un réfrigérateur domestique. Il détaille le modèle numérique développé sous ANSYS Fluent, en expliquant les hypothèses, les paramètres de simulation et les conditions aux limites. Parallèlement, les essais expérimentaux réalisés sur un congélateur sont décrits, incluant la préparation des matériaux, le protocole de mesure et les instruments utilisés. Cette double approche permet de valider les modèles numériques par comparaison avec les données expérimentales et d'observer le comportement réel des matériaux dans des conditions contrôlées.

## **Chapitre 4 : Analyse comparative des résultats – choix du matériau optimal et optimisation de la conductivité thermique**

Le dernier chapitre est consacré à l'analyse des résultats obtenus par simulation et expérimentation. Il vise à identifier le PCM ou nano-PCM offrant la meilleure performance thermique et énergétique, en tenant compte de critères tels que la capacité de stockage thermique, la conductivité, la stabilité et l'impact sur la consommation énergétique globale du système

frigorifique. Cette analyse permet de proposer des recommandations concrètes pour l'intégration optimale de ces matériaux dans les systèmes de réfrigération domestiques, en vue d'améliorer leur efficacité tout en réduisant leur empreinte énergétique.

## **OBJECTIFS DE LA RECHERCHE**

Étudier les composants, le fonctionnement et les cycles thermodynamiques des installations frigorifiques.

Analyser les propriétés thermiques, chimiques et physiques des matériaux à changement de phase (PCM) et des nano-PCM.

Intégrer expérimentalement et numériquement ces matériaux dans un système de réfrigération domestique.

- Évaluer l'impact de cette intégration sur :
- La consommation énergétique,
- La stabilité thermique,
- L'autonomie thermique en cas de coupure de courant.

Proposer des solutions durables pour améliorer l'efficacité énergétique des systèmes frigorifiques.

# CHAPITRE 1

## Synthèse sur les installations frigorifiques

Ce chapitre propose une revue de la littérature sur les installations frigorifiques. Il décrit dans un premier temps les principaux composants, les cycles thermodynamiques et les fluides frigorigènes utilisés dans ces installations. Ensuite, il présente les recherches récentes concernant la réfrigération domestique, mettant en lumière les avancées technologiques et les innovations dans ce domaine.

## **I.1 Installation Frigorifique :**

Une installation frigorifique est un système complexe constitué de plusieurs composants interconnectés, dont les interactions, tant entre eux qu'avec leur environnement (le milieu ambiant et l'extérieur), permettent de produire et de maintenir un froid à une température inférieure à celle de l'environnement. Ce système repose sur des principes thermodynamiques, où l'énergie thermique est transférée d'un espace à une température plus basse vers un autre espace à température plus élevée, généralement grâce à un fluide frigorigène qui subit des changements de phase dans un circuit fermé. Ce processus est essentiel pour diverses applications, telles que la réfrigération domestique, industrielle, ou encore la climatisation.

## **I.2 Principe De Fonctionnement :**

L'installation frigorifique fonctionne selon les principes thermodynamiques de la transition de phase du fluide frigorigène, notamment les changements d'état entre les phases gazeuse et liquide. Lorsque le fluide frigorigène passe de l'état liquide à l'état gazeux (évaporation), il absorbe de la chaleur, ce qui permet de refroidir l'espace à traiter. Ce processus se produit à une pression relativement faible et à une température élevée. En revanche, lorsque le fluide passe de la phase gazeuse à la phase liquide (condensation), il rejette la chaleur et se condense à une pression élevée et à une température relativement faible.

Le réfrigérateur ou le système frigorifique fonctionne selon un cycle thermodynamique en quatre étapes : compression, condensation, détente et évaporation. Ce cycle permet de transférer de la chaleur d'un endroit à un autre, assurant ainsi la production de froid. Le fluide frigorigène circule à travers ce cycle dans un circuit fermé, en subissant des changements de phase à chaque étape. [4] [5] [6].

Les quatre étapes du cycle frigorifique sont :

- Compression : Le fluide frigorigène gazeux est comprimé par le compresseur, ce qui augmente sa pression et sa température.
- Condensation : Le gaz comprimé et chaud est refroidi dans le condenseur, où il se condense en liquide à haute pression.

- Détente : Le fluide frigorigène liquide passe ensuite par une vanne de détente, où sa pression et sa température baissent.
- Évaporation : Le fluide à basse pression et température absorbe la chaleur du milieu ambiant dans l'évaporateur, ce qui le fait passer de l'état liquide à l'état gazeux, produisant ainsi le froid nécessaire. (Voir figure 1)

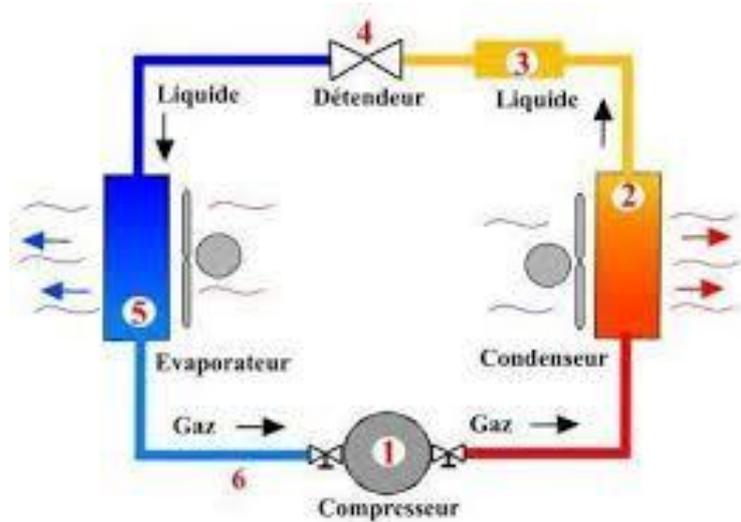


Figure 1. Schéma d'installation d'une machine frigorifique. [7]

### I.3 Composant De Machine Frigorifique :

Une machine frigorifique est un dispositif thermodynamique destiné à transférer de la chaleur d'un espace froid vers un espace plus chaud, en consommant de l'énergie. Elle est largement utilisée dans les domaines du froid domestique, industriel et commercial. Pour accomplir ce transfert de chaleur, la machine frigorifique se compose de plusieurs éléments essentiels, chacun ayant un rôle spécifique dans le cycle frigorifique. Cette introduction présente les principaux composants qui assurent le bon fonctionnement du système frigorifique. [8]

#### I.3.1 Compresseur :

Le compresseur frigorifique est un élément clé dans un système de réfrigération ou de climatisation. Son rôle principal est de comprimer le fluide frigorigène (souvent sous forme de gaz) afin d'augmenter sa pression et sa température. Ce fluide comprimé est ensuite propulsé à travers le circuit frigorifique pour permettre le transfert de chaleur et ainsi rafraîchir l'intérieur d'un appareil thermodynamique, comme un réfrigérateur ou un congélateur. [8]

Le compresseur joue également un rôle essentiel dans d'autres applications de réfrigération, telles que les systèmes de climatisation des véhicules (voitures, camions) et dans les véhicules frigorifiques utilisés pour le transport de produits périssables. Dans ces systèmes, le compresseur permet de maintenir une température basse à l'intérieur du compartiment réfrigéré ou de l'habitacle, en extrayant la chaleur de l'espace et en la rejetant à l'extérieur, garantissant ainsi un confort thermique ou la préservation des aliments et produits sensibles à la température. [8] (voir la figure 2)



Figure 2. Compresseur frigorifique [9]

### I.3.2 Condenseur :

Le condenseur joue un rôle fondamental dans un système frigorifique. Son objectif principal est de transférer la chaleur contenue dans les vapeurs de fluide frigorigène, qui ont été comprimées par le compresseur, vers un médium de refroidissement, comme l'air ou l'eau. Lorsque le fluide frigorigène passe dans le condenseur, il subit une condensation, ce qui permet de libérer l'énergie thermique qu'il a absorbée dans l'évaporateur. [10]

La quantité de chaleur à évacuer par le condenseur comprend plusieurs éléments :

- La chaleur latente de liquéfaction :

Il s'agit de la chaleur libérée lorsque le fluide frigorigène passe de l'état gazeux à l'état liquide. Ce processus de condensation est essentiel pour que le fluide frigorigène retourne à une forme liquide avant de passer à l'étape suivante du cycle frigorifique. [10]

- La chaleur sensible des vapeurs surchauffées :

Avant d'atteindre l'état de condensation, le fluide frigorigène peut être dans une phase de vapeur surchauffée. Cette chaleur sensible correspond à l'énergie thermique contenue dans la vapeur, au-delà de la température de saturation, qui doit également être évacuée lors du passage dans le condenseur. [10]

- La chaleur sensible du liquide jusqu'à une température proche de celle du médium de refroidissement :

Une fois que le fluide est condensé en liquide, il est encore chaud. Il faut donc réduire sa température sensible jusqu'à ce qu'elle soit proche de celle du médium de refroidissement (par exemple, l'air ambiant ou l'eau qui sert à dissiper la chaleur). [10]

Le condenseur est donc essentiel pour l'efficacité du cycle frigorifique, car il permet non seulement de transformer la vapeur en liquide, mais aussi de dissiper la chaleur accumulée, garantissant ainsi que le fluide frigorigène est prêt pour le processus de détente dans le détendeur.

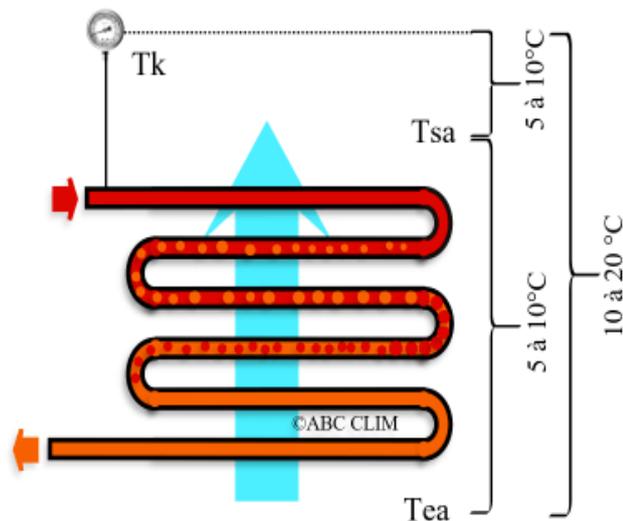


Figure 3. Schéma de Condenseur [11]

### I.3.3 Détendeur :

Le détendeur est un élément passif du circuit frigorifique, mais il est essentiel pour réaliser le cycle de compression/détente qui permet le transfert de l'énergie thermique (ou « calories ») de l'évaporateur vers le condenseur. Bien qu'il ne participe pas activement au transfert de chaleur, son rôle est fondamental pour assurer la bonne marche du système de réfrigération. [12]

Le détendeur permet de réduire la pression du fluide frigorigène, ce qui entraîne une baisse de sa température. Cette détente est nécessaire pour que le fluide frigorigène puisse absorber la chaleur de l'environnement dans l'évaporateur, où il se vaporise en exploitant l'énergie thermique des objets ou de l'air qu'il doit refroidir. Une fois que le fluide frigorigène a absorbé cette chaleur, il entre dans le compresseur sous forme de vapeur à basse pression et température.

Le détendeur, en ajustant la pression du fluide avant son entrée dans l'évaporateur, permet donc de maintenir un cycle efficace de compression/détente, garantissant ainsi un bon transfert de chaleur entre l'évaporateur et le condenseur. Ce processus est essentiel pour maintenir la performance du système frigorifique et garantir qu'il fonctionne à des niveaux optimaux d'efficacité énergétique. [12]

### I.3.4 Évaporateur :

Les évaporateurs sont des échangeurs thermiques, tout comme les condenseurs. Leur rôle principal est de permettre le transfert de chaleur entre le milieu à refroidir (par exemple, l'air ou un liquide) et le fluide frigorigène qui circule à l'intérieur. Ce processus de transfert thermique a pour effet de vaporiser le frigorigène liquide qui est contenu dans l'évaporateur.

L'évaporateur fonctionne à température constante, ce qui signifie que le fluide frigorigène absorbe la chaleur du milieu environnant et, en conséquence, il se vaporise. La chaleur absorbée par le fluide frigorigène correspond à sa chaleur latente de vaporisation, ce qui signifie qu'il passe de l'état liquide à l'état gazeux sans que la température n'augmente, contrairement à un échange thermique avec un fluide où la température change. Ce processus est différent de celui du condenseur, où le fluide frigorigène libère de la chaleur lors de sa condensation, et où la température du fluide diminue au fur et à mesure de ce processus. [13] (voir la figure 4)

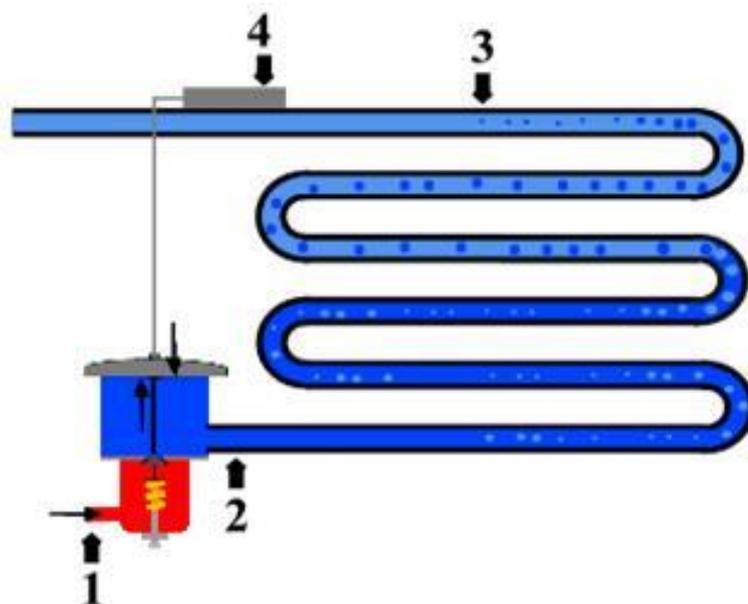


Figure 4. Schéma d'évaporateur [14]

### I.4 Cycle Frigorifique :

Le cycle frigorifique est un processus qui permet à un fluide frigorigène de passer par plusieurs états, alternant entre l'état gazeux et liquide, en fonction des changements de pression et de température. [4]

#### • Fonctionnement de machine frigorifique :

Le cycle frigorifique d'une machine frigorifique est habituellement représenté dans le diagramme thermodynamique enthalpie (h) - pression (Log P) appelé diagramme Enthalpie ou diagramme de Molliere des frigoristes [4]

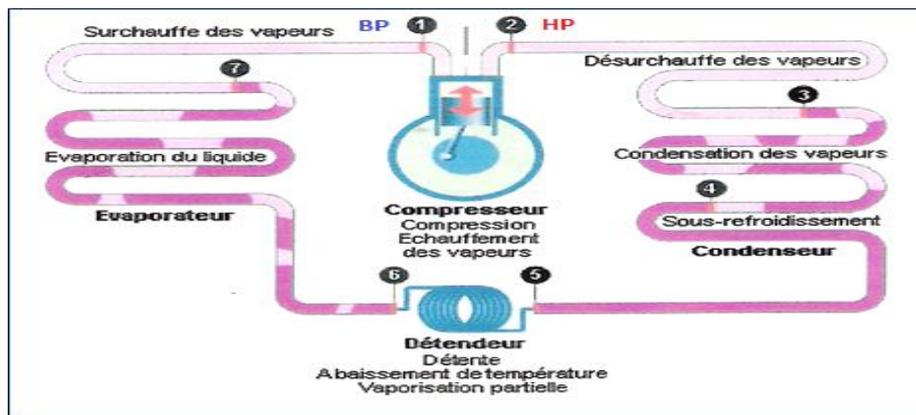


Figure 5. Description d'une installation frigorifique [15]

#### I.4.1 Cycle Thermodynamique :

Un cycle thermodynamique est un ensemble de transformations successives effectuées sur un système thermodynamique, où le système passe par différents états avant de revenir à son état initial. Ces transformations se produisent de manière contrôlée, ce qui permet au cycle de se répéter indéfiniment. Le cycle thermodynamique est essentiel pour le fonctionnement de nombreux appareils, tels que les moteurs thermiques, les réfrigérateurs, les pompes à chaleur, et les turbines. [16]

Un cycle thermodynamique se compose généralement de plusieurs étapes, dans lesquelles des paramètres comme la pression, la température, le volume et l'énergie sont modifiés. Ces transformations peuvent être :

- Isobare : où la pression reste constante.
- Isochore : où le volume reste constant.
- Isotherme : où la température reste constante.
- Adiabatique : où il n'y a pas de transfert de chaleur avec l'extérieur.

#### I.4.2 Diagramme Entropique T-S :

Le diagramme entropique T-S est un graphique qui représente les transformations thermodynamiques d'un fluide de travail, où l'axe des ordonnées représente la température (T) et l'axe des abscisses représente l'entropie (S). Ce diagramme est utilisé pour analyser et visualiser les processus thermodynamiques, comme ceux présents dans un cycle frigorifique ou dans un moteur thermique. Les courbes iso-paramétriques (isothermes, adiabatiques, isochores, etc.) ont des caractéristiques spécifiques sur ce diagramme, qui permettent de décrire les différents types de transformations dans un système. [17]

Les principales particularités du diagramme T-S sont les suivantes :

- Les isothermes sont horizontales :

Les courbes isothermes représentent des transformations à température constante. Sur le diagramme T-S, elles apparaissent comme des lignes horizontales. Cela signifie que, lors de ces transformations, l'entropie du fluide change sans que sa température ne varie. [17]

- Les adiabatiques réversibles (isentropiques) sont verticales :

Les transformations adiabatiques réversibles (ou isentropiques) se produisent sans échange de chaleur avec l'extérieur, et l'entropie reste constante. Sur le diagramme, ces transformations apparaissent comme des lignes verticales, car il n'y a pas de variation d'entropie (S constant).[17]

- Les adiabatiques irréversibles sont des courbes inclinées dans le sens des entropies croissantes :

Les adiabatiques irréversibles sont des transformations où l'entropie augmente (en raison de la dissipation de chaleur ou d'autres pertes irréversibles). Ces courbes sont inclinées vers la droite, dans le sens de l'augmentation de l'entropie, et diffèrent des adiabatiques réversibles. [17]

- Les isostatiques passent toutes par le point critique :

Les isochores (lignes de volume constant) passent par le point critique, qui est le point où les propriétés du fluide ne peuvent plus être distinguées entre liquide et vapeur. Ce point représente une phase particulière du fluide où les courbes de saturation se rejoignent. [17]

- Les isochores changent de direction à la courbe de saturation :

Les isochores changent de direction lorsqu'elles atteignent la courbe de saturation, c'est-à-dire la courbe qui sépare les zones de fluide saturé (mélange de liquide et de vapeur) de la zone de fluide super chauffé. Cela indique une transition dans le comportement du fluide, passant de la condensation à l'évaporation. [17]

- Le cycle de Carnot est représenté par un rectangle :

Le cycle de Carnot, qui est un cycle thermodynamique idéal, est représenté par un rectangle sur le diagramme T-S. Cela reflète les transformations isothermes et adiabatiques du cycle Carnot, dans lequel le fluide passe par des étapes de compression et d'expansion à température constante. [17]

- L'aire en dessous de la courbe représente la quantité de chaleur échangée :

L'aire sous la courbe dans un diagramme T-S représente la quantité de chaleur échangée avec le fluide pendant un processus donné. Plus l'aire est grande, plus la quantité de chaleur transférée est importante. [17]

- L'aire d'un cycle fermé représente le travail fourni :

Dans un cycle fermé (comme dans un moteur thermique ou un cycle frigorifique), l'aire formée par le cycle sur le diagramme T-S correspond au travail effectué par le fluide de travail. Cela est dû au fait

que le travail est la différence entre l'énergie thermique absorbée et l'énergie thermique rejetée au cours du cycle. [17]

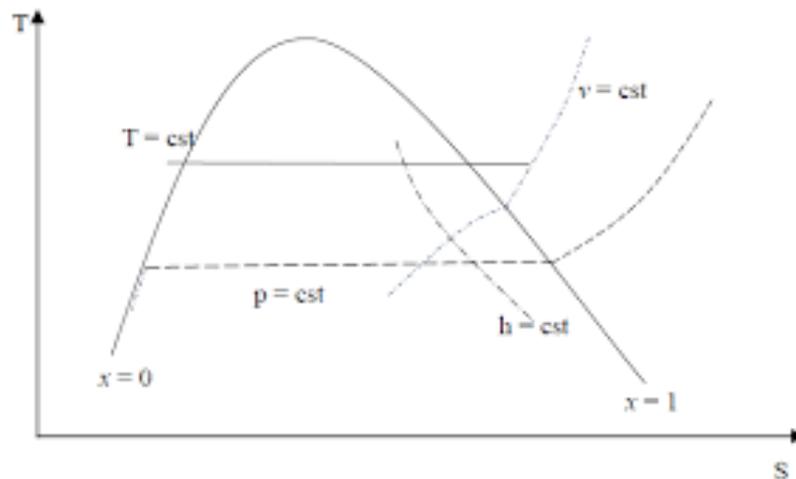


Figure 6. Diagramme T-S [18]

#### I.4.3 Cycle de Carnot :

Le cycle de Carnot est un modèle thermodynamique idéal qui comprend quatre transformations deux isothermes réversibles et deux adiabatiques réversibles (ainsi qu'isentropiques). Le trajet suivi durant ces transformations est orienté dans le sens trigonométrique. Ce cycle est souvent considéré comme le moyen le plus efficace pour transférer de la chaleur d'une source froide vers une source chaude, tout en accomplissant un travail. [19]

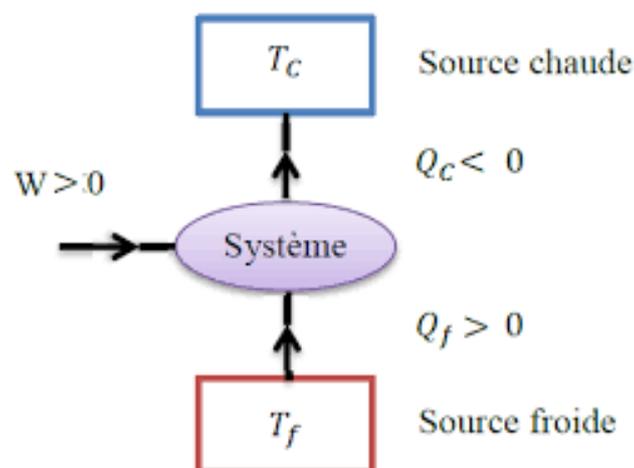


Figure 7. Schéma d'une installation frigorifique [20]

Les machines frigorifiques et les pompes à chaleur prélèvent de la chaleur de la source froide et utilisent un travail externe pour transférer cette chaleur vers la source chaude. Le cycle frigorifique de Carnot est représenté dans un diagramme (T, S) sous la forme d'un rectangle, comme montré dans la figure 9. Ce cycle se compose de quatre transformations successives. [21] (Voir la figure 8)

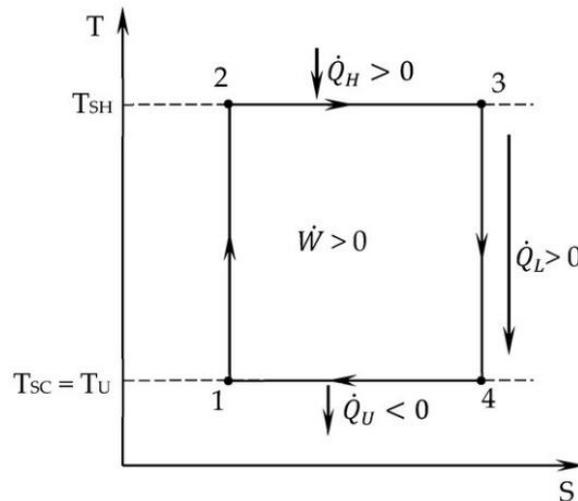


Figure 8. Cycle de Carnot [22]

CD : Évaporation, où la chaleur est transférée de l'espace froid vers le fluide réfrigérant.  
 DA : Compression adiabatique.  
 AB : Condensation, où la chaleur est transférée du fluide vers l'espace chaud.  
 AD : Détente adiabatique.

Les variables associées au cycle sont les suivantes :

- $Q_2$  : Quantité de chaleur extraite de la source froide (positive, en J).
- $Q_1$  : Quantité de chaleur transférée à la source chaude (négative, en J).
- $W$  : Travail nécessaire pour réaliser le cycle (positif, en J).
- $T_2$  : Température constante de la source froide (en K).
- $T_1$  : Température constante de la source chaude (en K).

#### I.4.4. Diagramme de Mollier (P-H) :

Les différentes étapes du fonctionnement de la machine frigorifique sont illustrées sur le diagramme pression-enthalpie (P-H). Ce diagramme représente le cycle frigorifique de la machine, souvent désigné sous le nom de cycle de référence ou cycle pratique par les frigoristes. [23]

### Diagramme enthalpique du cycle frigorifique : diagramme de Mollier

Sous la courbe « en cloche » se situe le mélange *liquide-vapeur*. A gauche de la cloche, le fluide est à l'état *liquide* (il se "sous-refroidit"). A droite, le fluide est à l'état *vapeur* (il "surchauffe").

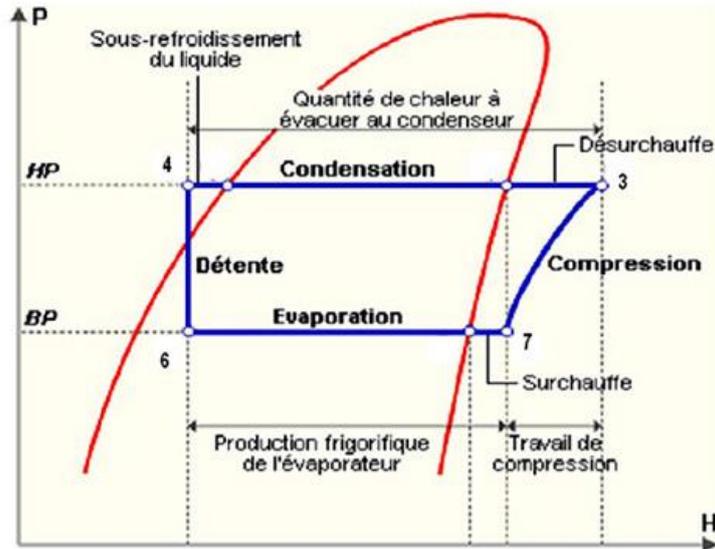


Figure 9. Cycle de Mollier [24]

### I.4.4. Diagramme de Clapeyron :

Le diagramme de Clapeyron, également appelé diagramme PV, est une représentation graphique qui montre la pression (P) d'un système thermodynamique en fonction de son volume massique (V) en physique, ou de son volume molaire en chimie. Il est utilisé pour suivre l'évolution d'une transformation thermodynamique au sein du système. [25]

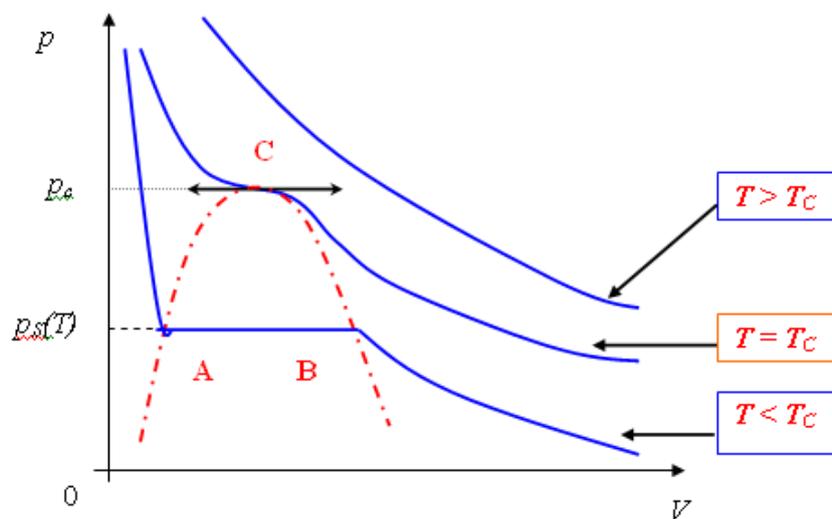


Figure 10. Cycle de Clapeyron [26]

## **I.5 Fluide Frigorigène :**

Un fluide frigorigène, également désigné sous le terme de réfrigérant, est une substance utilisée dans les systèmes thermodynamiques pour transférer de la chaleur. Il peut se présenter sous forme pure ou en mélange de fluides purs, et exister en phase liquide, gazeuse ou dans les deux à la fois, en fonction de la température et de la pression auxquelles il est soumis. Le fluide frigorigène est conçu pour absorber la chaleur à basse température et basse pression, puis la libérer à une température et une pression plus élevée, généralement par un changement d'état physique. Ce processus est au cœur des cycles frigorifiques, tels que ceux employés dans les réfrigérateurs, les climatiseurs et les pompes à chaleur. Dans ces systèmes, le fluide frigorigène circule à travers différents composants — évaporateur, compresseur, condenseur et détendeur subissant des transformations thermodynamiques qui lui permettent de capter et de restituer de la chaleur de manière efficace. [27]

Les fluides frigorigènes sont classés en plusieurs familles, notamment les fluides inorganiques purs (comme l'ammoniac ou le dioxyde de carbone), les hydrocarbures (propane, butane), les hydrocarbures halogénés (CFC, HCFC, HFC) et d'autres composés moins courants. Le choix du fluide frigorigène dépend de critères tels que la température d'évaporation, la capacité d'absorption de chaleur, la pression de vapeur saturante, ainsi que des considérations de sécurité et d'impact environnemental. Par exemple, les CFC, largement utilisés au XXe siècle, ont été progressivement éliminés en raison de leur effet destructeur sur la couche d'ozone, conformément au Protocole de Montréal signé en 1987. [27]

Il est important de noter que, bien que les fluides frigorigènes soient principalement associés aux systèmes de réfrigération et de climatisation, ils peuvent également être utilisés dans d'autres applications thermodynamiques, telles que les turbines à vapeur. Dans ces contextes, leur rôle peut différer, et ils peuvent ne pas être qualifiés de fluides frigorigènes selon la définition stricte. [27]

### **I.5.1 Propriétés du fluide frigorigène :**

Le choix du réfrigérant dans les systèmes thermiques dépend d'exigences spécifiques liées aux performances, à la sécurité et à l'environnement. Tous les liquides ne sont pas également adaptés aux cycles de réfrigération, même si, en théorie, toute substance ayant un point d'ébullition suffisamment bas peut remplir cette fonction. [28]

En pratique, les fluides utilisés doivent avant tout avoir une grande capacité à absorber l'énergie thermique lors de leur passage de la phase liquide à la phase gazeuse – ce phénomène, appelé chaleur latente de vaporisation, est essentiel pour l'efficacité énergétique des installations frigorifiques. [28]

Outre les performances thermodynamiques, d'autres critères techniques et réglementaires jouent un rôle :

Compatibilité environnementale : Les liquides doivent avoir un faible potentiel de réchauffement climatique et ne pas nuire à la couche d’ozone. [28]

Sécurité sanitaire : Ils doivent être non toxiques et peu inflammables pour garantir une utilisation en toute sécurité dans les zones peuplées. [28]

Adéquation aux conditions de fonctionnement : Le fluide sélectionné doit correspondre au profil de température et de pression du système considéré. Les réfrigérants adaptés aux températures extrêmement basses diffèrent de ceux utilisés dans les applications de confort thermique telles que la climatisation résidentielle. [28]

Ainsi, bien que des gaz courants comme l’air ou l’azote soient techniquement utilisables, ils sont rarement retenus dans les systèmes standards car leur efficacité est insuffisante pour répondre aux exigences industrielles actuelles. [28]

### I.5.2 Catégories du fluide frigorigène :

- ChloroFluoroCarbures (CFC) :

Les chlorofluorocarbures (CFC) sont une sous-classe de gaz fluorés, eux-mêmes appartenant à la famille des halogénoalcanes. Ces composés organiques sont dérivés des alcanes, dans lesquels tous les atomes d’hydrogène ont été remplacés par des atomes de chlore et de fluor. Cette substitution confère aux CFC des propriétés telles que la stabilité chimique, l’inflammabilité nulle et une faible toxicité, ce qui les rend adaptés à diverses applications industrielles, notamment comme réfrigérants, solvants. [29] (Voir tableau 1)

Tableau 1. Fluide frigorigène CFC

Cod refrigerant	Nom	Formule brute
R11	TRICHLOROFLUOROMETHANE	$\text{CCl}_3\text{F}$
R12	DICHLORODIFLUOROMETHANE	$\text{CCL}_2\text{F}_2$
R114A	1,1-DICHLORO-1,2,2,2-TETRAFLUOROETHANE	$\text{C}_2\text{F}_4\text{CL}_2$
R214	1,2,2,3-TETRACHLORO-1,1,3,3TETRAFLUOROPROPANE	$\text{C}_3\text{F}_4\text{CL}_4$

- HydroChloroFluoroCarbures (HCFC) :

Les hydrochlorofluorocarbures (HCFC) sont des gaz organiques composés d’atomes de chlore, de carbone, de fluor et d’hydrogène, classés parmi les alcanes halogénés. Ils ont été largement utilisés comme fluides frigorigènes et agents propulseurs dans les aérosols, en remplacement des chlorofluorocarbures (CFC), en raison de leur moindre impact sur la couche d’ozone. [30]

Cependant, bien que les HCFC soient moins stables que les CFC et présentent un potentiel de destruction de l'ozone réduit, ils demeurent des gaz à effet de serre puissants. Le Protocole de Copenhague a ainsi prévu leur élimination progressive : d'ici 2030 pour les pays industrialisés et 2040 pour les pays en développement. [30]

Parmi les HCFC couramment utilisés, le R-22 (chlorodifluorométhane) est le plus répandu. Il est employé dans les systèmes de climatisation et de réfrigération, bien que son utilisation soit désormais restreinte en raison de son impact environnemental. Voir tableau (2).

Tableau 2. Fluide frigorigène HCFC

COD REFRIGERANT	NOM	FORMULE BRUTE
R21	DICHLOROFLUOROMETHANE	CHFCL <sub>2</sub>
CHFCL <sub>2</sub>	CHLOROFLUOROMETHANE	CH <sub>2</sub> FCL
R121	1,1,2,2-TETRACHLORO-1-FLUOROETHANE	C <sub>2</sub> HFCL <sub>4</sub>
R121A	1,1,1,2-TETRACHLORO-2-FLUOROETHANE	C <sub>2</sub> HFCL <sub>4</sub>

- HydroFluoroCarbures (HFC) :

Les hydrofluorocarbures (HFC) sont des composés fluorés d'origine synthétique appartenant à la famille des halogénoalcanes. Constitués de carbone, de fluor et d'hydrogène, ils sont principalement utilisés en tant que substitués aux chlorofluorocarbures (CFC) et hydrochlorofluorocarbures (HCFC), notamment dans les systèmes de réfrigération, les climatiseurs, les aérosols, ainsi que dans la fabrication de mousses isolantes. [31]

Contrairement aux CFC, les HFC n'ont pas d'impact direct sur la couche d'ozone. De plus, ils offrent de bonnes performances énergétiques et des caractéristiques techniques similaires aux CFC, telles qu'une faible toxicité, une inflammabilité réduite pour certaines molécules (comme le HFC-152a), ainsi qu'une température de fonctionnement adaptée à leur utilisation comme fluides frigorigènes. Cela leur permet de répondre à la majorité des usages où les CFC étaient auparavant employés, tout en nécessitant des quantités moindres. [31]

Cependant, bien que considérés comme une alternative « propre » aux CFC en ce qui concerne la protection de la couche d'ozone, les HFC posent un sérieux problème environnemental en raison de leur fort potentiel de réchauffement global (PRG), qui peut atteindre jusqu'à 14 800 fois celui du dioxyde de carbone sur une période de 100 ans. En tant que gaz à effet de serre, leur utilisation est réglementée dans le cadre du Protocole de Kyoto, bien que cette réglementation ne s'applique de manière contraignante qu'aux pays développés. Leur consommation continue néanmoins d'augmenter rapidement dans les pays en développement, notamment sous les climats tropicaux, en raison de la forte demande en refroidissement. [31] voir tableau (3)

Tableau 3. Fluide frigorigène HFC

COD REFRIGERANT	NOM	FORMULE BRUTE
R23	TRIFLUOROMETHANE	CHF <sub>3</sub>
R32	DIFLUOROMETHANE	CH <sub>2</sub> F <sub>2</sub>
R41	FLUOROMETHANE	CH <sub>3</sub> F
R125	PENTAFLUROETHANE	C <sub>2</sub> HF <sub>5</sub>

### I.5.3 Réglementations :

La prise de conscience des effets destructeurs des CFC (chlorofluorocarbures) et des HCFC (hydrochlorofluorocarbures) sur la couche d'ozone a conduit à l'adoption du Protocole de Montréal en 1987, qui impose progressivement leur élimination. Ces substances ont été largement remplacées par les hydrofluorocarbures (HFC), dépourvus de chlore et donc inoffensifs pour l'ozone. Toutefois, bien que les HFC ne contribuent pas directement à l'appauvrissement de la couche d'ozone, leur fort potentiel de réchauffement climatique (PRG) a suscité de nouvelles préoccupations environnementales. [32]

En réponse, le Protocole de Kyoto a été adopté pour encadrer les émissions de gaz à effet de serre, dont font partie les HFC. À l'échelle européenne, cette volonté s'est traduite par l'instauration du règlement « F-Gaz », qui impose des obligations strictes relatives à la manipulation, au confinement, à la récupération et à la régénération des gaz fluorés. L'objectif principal de cette réglementation est de limiter les émissions de ces substances dans le secteur du froid, en alignant les pratiques industrielles sur les exigences environnementales actuelles. [32]

« F-Gaz » : gaz fluorés

### I.6 Fluide Frigorigène Naturel :

Face aux restrictions croissantes concernant l'usage des hydrocarbures halogénés tels que les CFC et les HCFC, en raison de leurs effets néfastes sur l'environnement, les fluides frigorigènes naturels suscitent aujourd'hui un intérêt croissant dans les secteurs de la réfrigération, de la climatisation et des pompes à chaleur. Leur faible impact environnemental, en particulier en matière de réchauffement climatique et de préservation de la couche d'ozone, en fait des candidats privilégiés pour remplacer progressivement les composés synthétiques. [33] Ces fluides naturels, tels que l'ammoniac (NH<sub>3</sub>), le dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>) et les hydrocarbures (comme le propane ou l'isobutane), sont étudiés pour leur compatibilité avec les cycles thermodynamiques modernes. Ils offrent généralement une efficacité énergétique élevée tout en présentant un potentiel de réchauffement global (PRG) très faible, voire nul

dans certains cas. Leur intégration dans les systèmes actuels nécessite cependant une adaptation technique, notamment en matière de sécurité et de réglementation. [33]

### **I.6.1 L'eau ou R718 :**

L'eau, classée parmi les fluides frigorigènes inorganiques, se distingue par son absence de toxicité et ses propriétés thermodynamiques intéressantes. Néanmoins, son utilisation reste limitée en raison de son incapacité à générer du froid à des températures inférieures à 0 °C, ce qui la rend inadaptée aux cycles de compression classiques. De ce fait, elle est rarement employée comme fluide frigorigène dans les systèmes de réfrigération conventionnels, sauf dans certains contextes spécifiques où ses caractéristiques peuvent être exploitées de manière optimale. [34]

### **I.6.2 CO<sub>2</sub> ou R744 :**

Le dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>), avec un potentiel de réchauffement global, suscite un intérêt croissant dans le secteur de la réfrigération et de la climatisation. Ce fluide frigorigène présente plusieurs avantages notables, notamment son caractère ininflammable, non toxique et son faible coût. De plus, bien qu'il offre de bonnes performances thermodynamiques, son utilisation présente certaines contraintes techniques. En effet, pour fonctionner efficacement dans les systèmes de production de froid, une pression élevée, supérieure à 100 bars, est nécessaire, ce qui impose l'emploi de composants spécifiques pour garantir la sécurité du système. [35]

Le CO<sub>2</sub> demeure toutefois moins performant dans des environnements climatiques chauds. Actuellement, il est principalement utilisé dans des applications telles que la réfrigération industrielle, la réfrigération dans les secteurs agroalimentaires, ainsi que dans les systèmes de production de froid négatif. Ses domaines d'application privilégiés comprennent également le commerce alimentaire, les pompes à chaleur et le refroidissement des équipements électroniques. [35]

### **I.6.3 L'ammoniac (NH<sub>3</sub> ou R717) :**

L'ammoniac est classé comme fluide frigorigène de type B2L, ce qui signifie qu'il est toxique et légèrement inflammable. Ce fluide présente d'excellentes propriétés de transfert de chaleur et se distingue par son efficacité énergétique, ce qui en fait une option très économique. Avec un potentiel de réchauffement global (GWP) égal à zéro, l'ammoniac est considéré comme un fluide frigorigène très respectueux de l'environnement. De plus, les coûts liés à son acquisition et à son exploitation sont nettement inférieurs à ceux des hydrofluorocarbures (HFC). [36]

Cependant, son utilisation nécessite de se conformer à des normes de sécurité rigoureuses en raison de ses caractéristiques de toxicité et d'inflammabilité. À ce jour, l'ammoniac est principalement utilisé dans les installations industrielles, où des mesures de sécurité spécifiques sont mises en place. Pour répondre à ces exigences réglementaires, des entreprises spécialisées, telles que Friga-Bohn, proposent des solutions frigorifiques innovantes et adaptées aux fluides frigorigènes naturels, offrant ainsi des équipements conformes aux normes de sécurité et aux besoins spécifiques des utilisateurs. [36]

#### **I.6.4 Fluide R600a :**

L'isobutane, également désigné sous le nom de R-600a, est un hydrocarbure utilisé dans diverses applications de réfrigération, telles que les réfrigérateurs domestiques et certains appareils de réfrigération commerciale. Cependant, le R-600a possède une capacité volumétrique inférieure de 50 % à celle des réfrigérants plus anciens comme le R-12 ou le R-134a, ce qui fait qu'il ne peut pas être considéré comme un substitut direct de ces derniers. [37]

Il est essentiel que les réfrigérants à base d'hydrocarbures soient d'une grande pureté afin d'éviter toute contamination par des impuretés telles que les sulfures ou l'eau, qui pourraient nuire aux huiles de lubrification et entraîner des défaillances des compresseurs. De plus, si l'hydrocarbure est mélangé avec d'autres hydrocarbures de moindre qualité, cela pourrait altérer de manière significative ses propriétés physiques et thermodynamiques. Enfin, contrairement aux hydrocarbures domestiques, l'isobutane utilisé dans les systèmes de réfrigération n'est pas odorisé, ce qui rend sa détection en cas de fuite beaucoup plus difficile, contrairement aux produits domestiques qui sont odorisés pour une détection rapide. [37]

#### **I.7 Conclusion :**

Après avoir terminé le premier chapitre, nous avons discuté de la définition du système de refroidissement et expliqué son mécanisme de fonctionnement en détail. Nous avons également étudié les types de gaz utilisés dans ces systèmes et expliqué les propriétés physiques de chaque type. Cependant, l'aspect le plus important de cette recherche est l'étude des matériaux à changement de phase (PCM) et des nanoparticules, leurs propriétés, leurs types et bien d'autres choses qui seront discutées en détail dans le deuxième chapitre.

# CHAPITRE 2

## **Matériaux à changement de phase (PCM) et nanoparticule**

Ce chapitre traite de l'étude des matériaux à changement de phase (PCM) et l'intégration des nano particules dans matériaux à changement de phase (Nano PCM) et de leurs diverses applications dans les systèmes et équipements de réfrigération. Cette section met en évidence l'importance croissante du domaine du stockage thermique, avec un accent particulier sur l'intégration des matériaux PCM et Nano-PCM dans les applications de réfrigération, compte tenu de leur rôle efficace dans l'amélioration de l'efficacité thermique et l'amélioration des performances des systèmes de réfrigération.

## **II.1 Matériaux à changement de phase (PCM) :**

Les matériaux à changement de phase (PCM) sont une technologie moderne utilisée pour améliorer l'efficacité des systèmes de gestion de l'énergie thermique. Ces matériaux se caractérisent par leur capacité à stocker et à libérer de grandes quantités d'énergie thermique lorsqu'ils passent d'un état à un autre, comme lorsqu'ils passent de l'état solide à l'état liquide et vice versa. Les PCM sont utilisés dans de nombreuses applications d'ingénierie, notamment dans les systèmes de réfrigération et de climatisation, où ils contribuent à réduire la consommation d'énergie en maintenant les températures dans des plages spécifiques pendant des périodes plus longues. L'intégration de ces matériaux dans la conception des équipements thermiques représente une étape importante vers la réalisation de systèmes plus durables et plus efficaces. [38] Ci-dessous, une photo d'un des types PCM (voir la figure 11).



Figure 11. Matériau à changement de phase [39]

## **II.2 Différents types de PCM :**

Il existe 2 types : organique et inorganique

### **II.2.1 PCM organique :**

Les matériaux à changement de phase (PCM) organiques les plus couramment employés pour le stockage de l'énergie thermique sont principalement les paraffines et les acides gras.

Les paraffines, issues du processus de raffinage du pétrole, sont des hydrocarbures linéaires de formule générale  $C_nH_{2n+2}$  ( $CH_3-(CH_2)_n-CH_3$ ). Elles présentent une enthalpie de fusion relativement élevée, comprise entre 175 et 250  $\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$ , ainsi qu'une température de fusion qui varie de 5 à 100 °C selon la longueur de la chaîne carbonée.

Elles se distinguent par leur stabilité chimique et thermique au fil du temps, et par l'absence de phénomène de surfusion. Toutefois, elles présentent certains inconvénients, notamment leur caractère inflammable et leur variation volumique importante (supérieure à 12 %) au cours du changement de phase. [40]

### **II.2.2 PCM inorganique :**

Les matériaux à changement de phase (PCM) inorganiques présentent généralement une capacité de stockage thermique par chaleur latente plus élevée que celle des PCM organiques. Une caractéristique notable de ces matériaux est leur transition de phase qui s'effectue à une température bien définie.

Parmi les PCM inorganiques, les plus couramment étudiés et utilisés sont les sels hydratés. Ces derniers offrent une enthalpie de fusion comprise entre 150 et 250  $\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$ , et présentent plusieurs avantages, notamment leur faible coût, leur abondance, ainsi qu'une variation volumique minimale lors du changement d'état.

Cependant, leur utilisation est limitée par certains inconvénients, tels que leur tendance à la surfusion importante, et leur fort pouvoir corrosif, ce qui nécessite des précautions particulières dans le choix des matériaux d'encapsulation. [40]

### **II.2.3 Différence entre PCM organique et PCM inorganique :**

Les matériaux à changement de phase (PCM) organiques se distinguent par leur stabilité chimique élevée, leur absence de corrosion et un comportement thermodynamique constant au fil des cycles thermiques. Toutefois, leur faible conductivité thermique ainsi que leur inflammabilité constituent des limites significatives, en particulier dans les applications nécessitant une réponse thermique rapide et efficace.

À l'inverse, les PCM inorganiques présentent une densité énergétique plus importante et une meilleure conductivité thermique, ce qui les rend adaptés aux systèmes de transfert de chaleur nécessitant une performance élevée. Néanmoins, ces matériaux souffrent de problèmes de corrosion, en particulier vis-à-vis des matériaux métalliques, ainsi que de risques de surfusion et de séparation des phases à la solidification, ce qui peut compromettre la durabilité et l'efficacité des cycles d'accumulation thermique.

#### **II.2.4 PCM eutectiques :**

Les PCMs eutectiques sont des mélanges spécifiques constitués à partir de deux types principaux de PCMs : organiques et inorganiques. La combinaison de ces deux classes de matériaux permet de créer des PCMs avec des propriétés thermiques ajustables et optimisées pour des applications ciblées.

Les eutectiques présentent des avantages significatifs :

- **Point de fusion précis :** Les mélanges eutectiques ont la particularité de fondre et de se solidifier à une température unique et bien définie, contrairement aux mélanges non eutectiques qui présentent une plage de fusion. Ce point de fusion net est crucial pour les applications où une transition de phase à une température spécifique est requise.
- **Chaleur latente élevée :** Les PCMs eutectiques peuvent offrir une chaleur latente de fusion élevée, ce qui signifie qu'ils peuvent stocker et libérer une grande quantité d'énergie thermique lors du changement de phase.
- **Stabilité thermique :** La combinaison de PCMs organiques et inorganiques peut améliorer la stabilité thermique du matériau composite, réduisant ainsi la dégradation au cours des cycles de fusion/solidification répétés.

### **II.3 Avantages et les inconvénients de PCM :**

L'utilisation des matériaux à changement de phase (PCM) dans le domaine de la réfrigération vise essentiellement à réduire ou à décaler la charge thermique de refroidissement, tout en assurant le maintien d'une température stable pour l'utilisateur final. En d'autres termes, l'objectif est de conserver les produits stockés dans l'unité réfrigérée à une température constante, même en cas de coupure d'alimentation ou de variation de charge thermique.

### **II.3.1 Avantage :**

L'intégration des matériaux à changement de phase (PCM) dans les systèmes de réfrigération permet de réaliser des économies d'énergie, d'améliorer le rendement global du système, de prolonger la durée de vie des équipements, et de réduire les coûts liés à la maintenance.

En réfrigération, la stabilisation thermique obtenue grâce aux PCM, en réduisant les fluctuations de température et leur volatilité, a un impact direct et positif sur la qualité des denrées alimentaires, la préservation de l'intégrité des vaccins, ainsi que d'autres produits thermosensibles.

D'un point de vue énergétique plus large, un des atouts majeurs des PCM réside dans leur capacité à faciliter une gestion flexible de la charge énergétique. En effet, le pré-refroidissement d'un système utilisant des PCM avant une période de forte demande énergétique (pic de consommation) ou avant une coupure de courant permet de disposer d'une réserve de froid stockée. Cette capacité réduit non seulement la probabilité d'ajouter une charge supplémentaire sur le réseau électrique durant ces périodes critiques, mais diminue également la dépendance à des sources de secours inefficaces et fortement émettrices de carbone. [41]

### **II.3.2 Inconvénient :**

Les matériaux à changement de phase (PCM) présentent plusieurs limitations techniques qu'il est essentiel de considérer pour leur intégration efficace dans les systèmes thermiques.

La surfusion est un phénomène observé principalement avec certains PCM inorganiques. Elle se manifeste lorsque le matériau reste à l'état liquide même si sa température est inférieure à sa température de cristallisation, compromettant ainsi la prévisibilité du changement de phase.

Les vitesses de cristallisation des PCM sont souvent faibles. Cela signifie qu'un délai trop long est nécessaire pour accumuler ou libérer l'énergie latente, ce qui peut réduire considérablement leur efficacité dans des situations où une réponse thermique rapide est requise, comme dans le lissage des pics de température.

Lors du changement de phase, l'échange thermique se produit à l'interface solide/liquide. À mesure que le front de fusion ou de solidification progresse, il crée une phase intermédiaire (solide ou liquide) que le flux thermique doit traverser. Plus cette couche est épaisse, plus la résistance thermique qu'elle induit est importante, limitant l'efficacité globale du transfert de chaleur. [41]

## **II.4 Chaleur latent :**

La chaleur latente, également appelée enthalpie de changement d'état, désigne la quantité d'énergie nécessaire à une substance pour passer d'un état physique à un autre (solide, liquide ou gazeux), sans

variation de température pendant le processus. Cette quantité d'énergie dépend des conditions de pression. À titre d'exemple, l'eau ne bout pas à la même température au niveau de la mer qu'en altitude. Sous pression atmosphérique normale, la chaleur latente de fusion de l'eau est d'environ  $333 \text{ kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$  à  $0^\circ\text{C}$ . Autrement dit, il est nécessaire de fournir 333 kilojoules pour transformer 1 kilogramme de glace en eau liquide à cette température, sans changement de température pendant la transition.

Les valeurs de chaleur latente, et plus particulièrement celles de vaporisation des fluides frigorigènes, jouent un rôle essentiel dans le dimensionnement et le calcul des performances des systèmes thermodynamiques tels que les réfrigérateurs, pompes à chaleur et autres machines frigorifiques. [42]

Formule :

$$L_{ch} = Q/m \dots\dots\dots (1)$$

Avec :

m: masse.

L : chaleur latente spécifique d'une substance.

Q : énergie relâchée ou absorbée lors du changement.

#### **II.4.1 Stockage par chaleur latente :**

Le stockage thermique par chaleur latente constitue une solution efficace pour valoriser et différer dans le temps l'utilisation de la chaleur fatale récupérée. Ce type de stockage repose sur l'exploitation de l'énergie latente de fusion d'un Matériau à Changement de Phase (PCM), c'est-à-dire sa capacité à passer de l'état solide à l'état liquide (fusion) sous l'effet d'un apport thermique.

Lors du processus de fusion, le PCM absorbe une quantité significative d'énergie thermique, qui est ensuite restituée lors de sa solidification. Ce mécanisme permet ainsi d'emmagasiner de l'énergie sous forme latente et de la restituer ultérieurement, en fonction des besoins.

Ce type de système nécessite généralement l'intervention d'un fluide caloporteur, chargé d'assurer le transfert thermique entre la source de chaleur et l'unité de stockage. Étant donné que le PCM subit des cycles de fusion/solidification, il ne peut pas être utilisé comme fluide circulant ; il est donc confiné dans une unité fixe de stockage.

Plusieurs technologies de transfert thermique sont mises en œuvre pour optimiser les échanges : échangeurs à tubes et ailettes, échangeurs multitubulaires, ou encore systèmes d'encapsulation du PCM. Le principe de fonctionnement est le suivant : lorsqu'un fluide chaud entre en contact indirect avec le PCM, celui-ci absorbe la chaleur et subit une transition de l'état solide vers l'état liquide, stockant ainsi l'énergie.

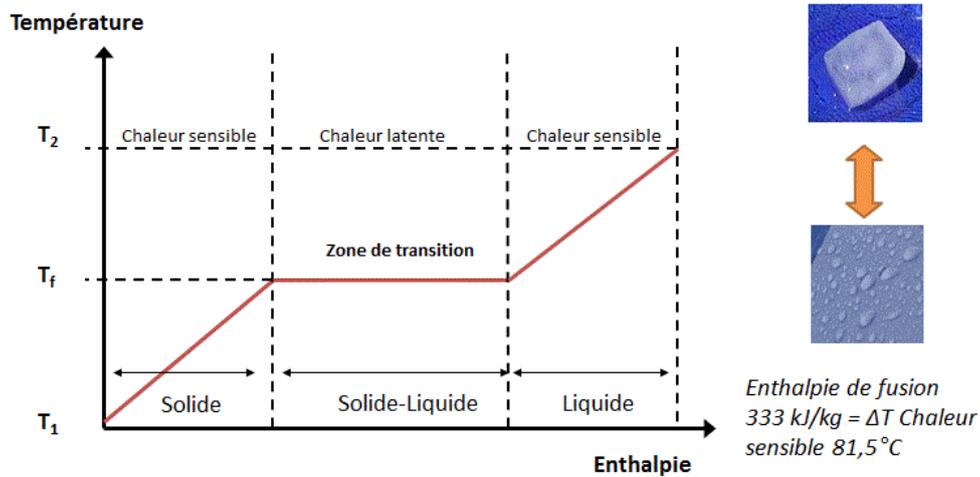


Figure 12. Stockage de l'énergie. [43]

À l'inverse, lorsque le fluide est froid, le matériau à changement de phase (PCM) libère la chaleur qu'il a emmagasinée en se solidifiant, ce qui permet de réchauffer le fluide caloporteur.

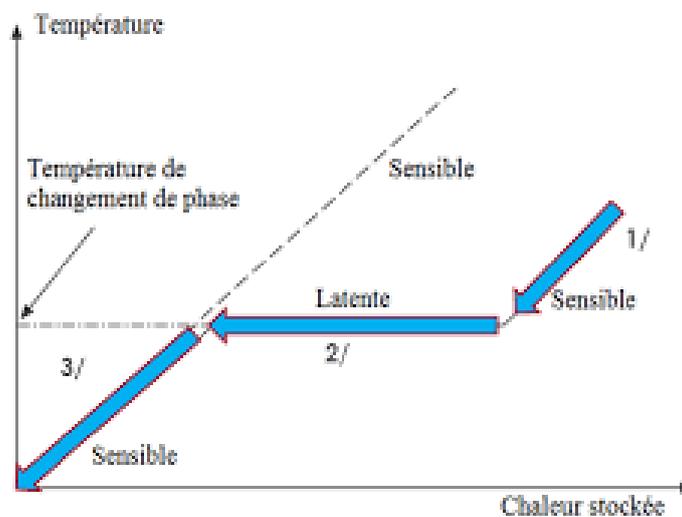


Figure 13. Décharge de l'énergie. [43]

#### II.4.2 Le changement de phase d'un point de vue énergétique :

Dans un premier temps, le liquide subit un refroidissement progressif en libérant de la chaleur sensible, ce qui provoque une diminution de sa température jusqu'à ce qu'elle atteigne le point de fusion. À ce moment précis, un changement d'état s'amorce : la substance pure passe de la phase liquide à la phase solide tout en maintenant une température constante, égale à la température de fusion. Cette

transformation est accompagnée d'un dégagement de chaleur latente de fusion. Une fois la solidification terminée, la substance, désormais à l'état solide, continue de se refroidir en libérant à nouveau de la chaleur sensible jusqu'à atteindre la température d'équilibre finale T2.

L'énergie totale dégagée au cours de l'ensemble de ce processus du refroidissement initial à T1 jusqu'à la température finale T2 correspond à la somme des chaleurs sensible et latente échangées pendant les trois étapes. [43]

$$h_l = m \times C_{pl} \times (T_1 - T_f) \dots\dots\dots (2)$$

$$m \times L_{ch} \dots\dots\dots (3)$$

$$h_s = m \times C_{ps} \times (T_f - T_2) \dots\dots\dots (4)$$

On note  $C_{pl}$  la capacité calorifique massique du liquide  $C_{ps}$  celle du solide et  $L_{ch}$  a chaleur latente de fusion. L'énergie totale échangée lors du passage de l'état liquide à l'état solide, incluant les phases de refroidissement avant et après la solidification, ainsi que le changement d'état lui-même, peut être représentée graphiquement. En effet, l'aire sous la courbe du flux thermique en fonction du temps illustre cette énergie totale transférée au cours de la transformation. [43]

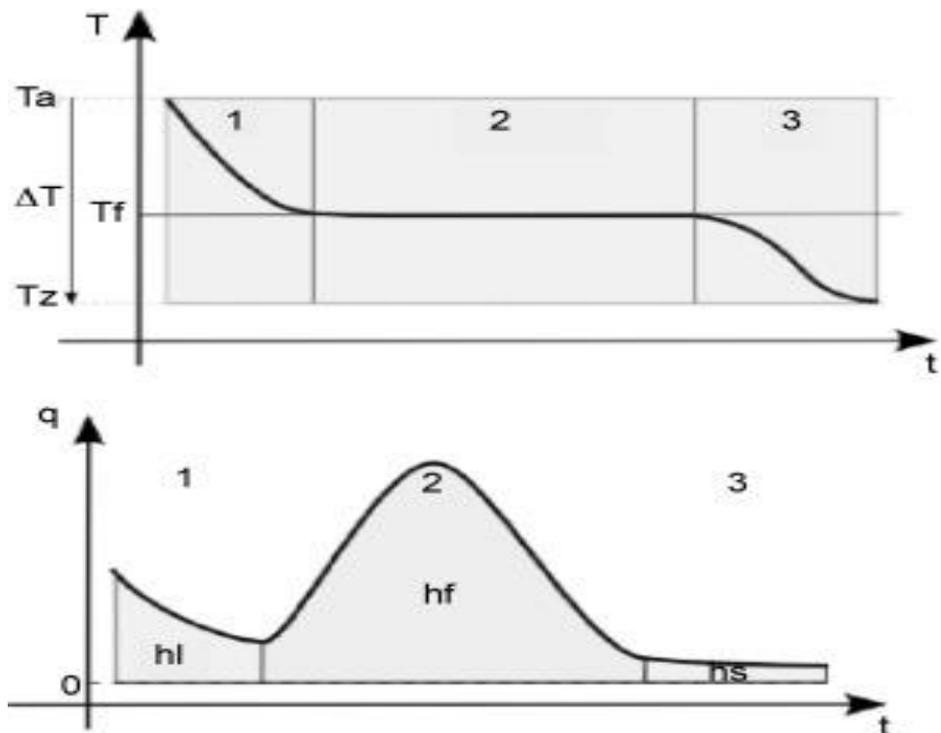


Figure 14. Comportement thermique et cinétique d'un corps pur idéal lors de la solidification [43]

**II.5 Caractéristiques de PCM :**

Le choix d'un matériau à changement de phase (PCM) pour une application donnée nécessite une analyse approfondie de ses propriétés thermiques, physiques et chimiques, car aucun matériau ne

présente toutes les caractéristiques idéales. En effet, chaque PCM possède des avantages spécifiques, mais également des limites, ce qui oblige souvent à faire des compromis en fonction des exigences du système. Les principales propriétés à évaluer incluent notamment la température de changement de phase, la capacité thermique latente, la conductivité thermique, la stabilité à long terme, ainsi que la compatibilité avec les matériaux environnants. Il est important de souligner que, même si les caractéristiques de nombreux PCM ont été largement étudiées en laboratoire, les performances réelles peuvent différer en conditions industrielles. Ces écarts sont souvent dus à des facteurs comme la présence d'impuretés, des compositions variables ou des modifications de la structure moléculaire, notamment dans le cas des polymères. De plus, l'ajout d'additifs, tels que les stabilisants indispensables pour maintenir la stabilité des hydrates de sel, peut altérer les propriétés thermiques du matériau, en particulier sa capacité de stockage énergétique. Par conséquent, il est fortement recommandé de se baser sur des résultats expérimentaux concrets obtenus dans des conditions proches de l'application réelle, plutôt que de se fier uniquement aux données fournies par les fabricants. [44]

## **II.6 Applications des PCM dans les équipements frigorifiques :**

Dans les équipements frigorifiques, ces matériaux sont intégrés pour stabiliser la température intérieure, réduire la fréquence de démarrage du compresseur et prolonger la durée de maintien au froid en cas de coupure de courant. Ils sont particulièrement efficaces dans les systèmes de stockage frigorifique intermittents, comme les glacières médicales ou les chambres froides solaires. De plus, leur utilisation dans les parois ou les accumulateurs de froid permet d'améliorer le rendement énergétique global des installations en limitant les pics de consommation et en assurant une distribution thermique plus uniforme. [45]

### **II.6.1. Réfrigérateur domestique :**

Un modèle dynamique de réfrigérateur intégrant un matériau à changement de phase (PCM) en contact avec l'évaporateur a été développé et validé expérimentalement. Il a été observé que l'ajout de PCM améliore le transfert thermique au niveau de l'évaporateur, entraînant ainsi une augmentation du coefficient de performance (COP) de l'ordre de 5 à 15 %. L'intégration de PCM permet également de réduire le nombre de cycles de marche/arrêt du compresseur, ce qui prolonge l'autonomie du réfrigérateur, passant de 1 à 3 heures pour un réfrigérateur conventionnel à 5 à 9 heures. Cette amélioration contribue également à réduire les fluctuations de température dans le compartiment frigorifique. [45]

En outre, des études ont été menées pour analyser l'impact de l'intégration d'un échangeur thermique avec PCM sur la consommation électrique d'un réfrigérateur domestique. Un PCM organique, ayant une température de changement de phase de 4°C et une chaleur latente de 200 kJ/kg, a été utilisé dans ces études. Différents emplacements de PCM dans le compartiment froid ont été testés à l'aide d'un modèle de simulation numérique (CFD), permettant ainsi une analyse précise des effets de ces matériaux sur les performances globales du système. [47]

Des travaux récents sur l'incorporation de matériaux à changement de phase (PCM) dans les systèmes de réfrigération ont mis en évidence leur grand potentiel d'amélioration énergétique. L'utilisation de ces matériaux permet d'augmenter le coefficient de performance (COP) jusqu'à 8%, tout en réduisant la consommation électrique d'environ 12%. De plus, certaines configurations permettent une meilleure stratification thermique au sein des compartiments réfrigérés.

Les résultats de la modélisation numérique indiquent que l'orientation horizontale des PCM offre une efficacité thermique supérieure à la disposition verticale. De plus, l'utilisation de matériaux à faible température de changement de phase contribue à une meilleure stabilité thermique du système.

D'autres études expérimentales confirment que les PCM sont capables de réduire les fluctuations de température, de réduire la taille des cristaux dans les produits délicats tels que la crème glacée et de réduire la perte d'eau, améliorant ainsi la qualité des aliments stockés.

L'efficacité des dispositifs de contrôle de la température est également perceptible lors des phases critiques de fonctionnement, telles que le dégivrage ou l'ouverture des portes, où l'on observe une réduction de la consommation d'énergie d'environ 7 à 8 %. Enfin, la sélection appropriée de la température de changement de phase du matériau est un paramètre critique pour garantir des performances optimales du système. [45]

## **II.6.2 Transports frigorifiques :**

Le transport frigorifique constitue un maillon essentiel de la chaîne du froid, indispensable à la conservation des denrées périssables. Cependant, il représente également un défi énergétique majeur, notamment en raison de sa contribution significative aux émissions de gaz à effet de serre, générées à la fois par la production de froid et par le fonctionnement des véhicules de transport. [48]

De nombreuses solutions sont actuellement mises en œuvre pour optimiser ce secteur, notamment l'utilisation de plaques eutectiques contenant des matériaux à changement de phase (PCM). Ces plaques sont rechargées thermiquement durant la nuit via le réseau électrique, puis assurent le maintien de la température interne du compartiment réfrigéré durant les livraisons quotidiennes. Si ces systèmes se

révèlent globalement efficaces, ils peuvent néanmoins montrer certaines limites, en particulier lors des périodes de fortes chaleurs ou en cas d'ouvertures fréquentes des portes.

En outre, la présence de groupes frigorifiques embarqués alourdit les véhicules à vide et réduit l'espace disponible pour les marchandises. Pour pallier ces contraintes, des alternatives technologiques sont à l'étude. Parmi celles-ci, le stockage d'énergie thermique à l'aide de PCM permet de restituer le froid uniquement lorsque cela est nécessaire, limitant ainsi les pertes thermiques lors des ouvertures de portes et contribuant à une baisse de la consommation énergétique. [45]

Des solutions innovantes ont également été explorées, telles que l'intégration de tubes contenant des PCM directement dans les parois isolantes des camions. L'utilisation de paraffine dans ces panneaux a permis de réduire les transferts thermiques vers l'extérieur de l'ordre de 16,3 %, tout en atténuant les variations de température à l'intérieur du compartiment. Cette technologie permet non seulement de stabiliser les conditions thermiques, mais aussi de réduire la taille des équipements frigorifiques requis et de limiter les émissions liées à l'usage de moteurs thermiques. [45]

### **II.6.3 Meubles frigorifiques de vents :**

Malgré les avancées technologiques dans le domaine du froid commercial, l'intégration des matériaux à changement de phase (PCM) dans les meubles frigorifiques destinés à la vente demeure peu étudiée. Lu et al. (2020) ont développé un prototype d'étagère innovant intégrant des tubes échangeurs thermiques remplis de PCM. Ce système a permis de diminuer la température des produits de 3 à 5 °C et de limiter la hausse thermique à 1,5 °C durant les phases de dégivrage, sans entraîner de surconsommation énergétique. Par ailleurs, SEVAULT et al. (2012) ont réalisé des simulations numériques montrant que l'efficacité de la charge et de la décharge des PCM dépend fortement de la géométrie de l'échangeur, en particulier en fonction du volume de stockage. Enfin, Mehmet et al. (2019) ont analysé les effets d'une plaque de PCM à base d'eau installée à proximité de l'évaporateur dans un distributeur de boissons, mettant en évidence son impact favorable sur le comportement thermique et l'écoulement de l'air. [45]

De nombreuses recherches [45] récentes se sont penchées sur l'intégration des matériaux à changement de phase (PCM) dans les équipements frigorifiques utilisés en distribution. Lu et al. (2020) ont mis au point une étagère équipée d'échangeurs thermiques contenant des PCM, permettant une réduction de la température des produits de l'ordre de 3 à 5 °C et une stabilisation thermique efficace lors des cycles de dégivrage, sans surconsommation énergétique. Par ailleurs, les travaux de SEVAULT et al. (2012), fondés sur des simulations numériques, ont mis en évidence que la géométrie des échangeurs thermiques joue un rôle déterminant dans les durées de charge et de décharge des PCM.

Dans une autre étude, Mehmet et al. (2019) ont examiné l'effet d'une plaque de PCM sur les performances thermiques et l'aérodynamique interne d'un distributeur de boissons. Ils ont observé qu'une augmentation de l'épaisseur de la plaque engendre une perte de charge plus importante et une diminution de la vitesse de l'air. Toutefois, une épaisseur de 6 mm représente un bon compromis entre performance thermique et fluidité de l'air. Cette configuration

Contribue à une meilleure régulation de la température intérieure et à une réduction de la fréquence des cycles du compresseur. [45]

Enfin, ont intégré 1,2 kg de PCM eutectique dans un meuble frigorifique ouvert. Les résultats obtenus indiquent une amélioration de l'homogénéité thermique, une atténuation des pics de température lors du dégivrage, ainsi qu'une diminution de la consommation énergétique d'environ 5 % dans des conditions ambiantes tempérées (20 °C, 60 % d'humidité relative). [45]

## II.7 Nanoparticule :

Les nanoparticules sont des particules ultrafines (1 à 100 nm) introduites dans les fluides caloporteurs (comme les liquides de refroidissement) pour former ce qu'on appelle des nano fluides. Leur but principal est d'améliorer la conductivité thermique du fluide, augmentant ainsi l'efficacité de l'échange de chaleur et la performance énergétique du système de refroidissement. [46]



Figure 15. Nanoparticule [46]

### II.7.1. Type de Nanoparticule :

- Nanoparticules métalliques :

Ils contiennent des particules de métaux tels que le cuivre (Cu), l'aluminium (Al), l'argent (Ag) et l'or (Au), et présentent une conductivité thermique élevée, ce qui les rend efficaces pour améliorer les performances de transfert de chaleur. [46]



Figure 16. Nanoparticules métalliques [46]

- Nanoparticules d'oxyde métallique :

Tels que l'oxyde d'aluminium ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), l'oxyde de cuivre ( $\text{CuO}$ ) et le dioxyde de titane ( $\text{TiO}_2$ ). Ces molécules sont plus stables et moins chères que les métaux purs, avec de bonnes propriétés thermiques. [47]



Figure 17. Nanoparticules d'oxyde métallique [46]

- Nanotubes de carbone (NTC) :

Il présente une conductivité thermique très élevée et une excellente résistance mécanique, et est utilisé efficacement dans les systèmes de transfert de chaleur avancés. [48]

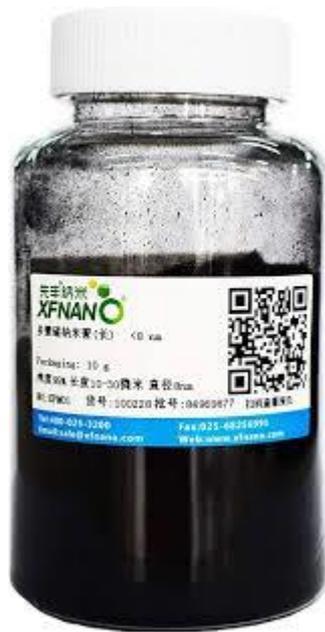


Figure 18. Nanotubes de carbone (NTC) [46]

- Nanoparticules céramiques :

Comme le carbure de silicium (SiC), ils sont utilisés dans des applications qui nécessitent une stabilité thermique élevée et une résistance aux températures élevées. [49]

- Nanoparticules hybrides :

Il s'agit de nano composites constitués de deux ou plusieurs types de molécules, qui visent à améliorer les propriétés de transport et de dispersion thermiques au sein des fluides thermiques. [49]

## II.8 Matériaux à changement de phase -Nanoparticule (Nano PCM) :

Les nano-PCM sont des systèmes thermoélectriques avancés constitués de matériaux à changement de phase (PCM) contenant des nanoparticules ajoutées ou enfermées dans leur structure. Ces nano-additifs visent à améliorer les propriétés thermiques du PCM conventionnel, notamment en termes de conductivité thermique, de taux de fusion et de solidification et de stabilité des performances lors de cycles thermiques répétés. [50]

Les nanoparticules accélèrent le transfert de chaleur au sein du matériau, augmentant l'efficacité du stockage thermique et réduisant les pertes d'énergie, rendant le nano PCM plus adapté aux applications avancées et précises, telles que les systèmes de refroidissement intégrés, l'électronique thermoélectrique et les énergies renouvelables. [50]

## **II.9 Caractéristiques de nano PCM :**

- Capacité de stockage thermique :

Les PCM sont capables de stocker une grande quantité d'énergie thermique sous forme de chaleur sensible. [51]

- Amélioration de transfert de chaleur :

Les propriétés des PCM peuvent être améliorées par l'intégration des nanoparticules ( $\text{TiO}_2$ ) et ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) dans les PCM. Qui augmentent la conductivité thermique, rendant le processus de transfert thermique plus rapide. [51]

- Conductivité thermique accrue :

L'ajout de nanoparticules (métalliques ou d'oxydes métalliques) permet d'augmenter significativement la conductivité thermique du PCM, réduisant ainsi le temps nécessaire pour fondre ou se solidifier. [51]

- Temps de réponse thermique réduit :

Grâce à une meilleure distribution de la chaleur, les nano-PCM réagissent plus rapidement aux variations de température. [51]

- Stabilité thermique et cyclique :

Les nano-PCM conservent leurs propriétés thermiques sur un grand nombre de cycles fusion/solidification, ce qui les rend fiables pour une utilisation à long terme. [51]

- Compatibilité avec diverses matrices :

Les nano-PCM peuvent être intégrés dans différents types de matériaux hôtes pour des applications variées : systèmes de refroidissement, électroniques, etc. [51]

## **II.10 Intégration des (PCM) et des nano-PCM dans les réfrigérateurs :**

L'incorporation de matériaux à changement de phase (PCM) et de leurs nano-dérivés, les nano-PCM, dans les systèmes de réfrigération domestiques représente une avancée significative en termes de performance énergétique et de stabilité thermique. Contrairement aux thermostats conventionnels qui reposent uniquement sur le compresseur et le thermostat, les modules à changement de phase (PCM) permettent de lisser les variations de température tout en réduisant la charge de travail du compresseur. [52]

- Réduire la consommation d'énergie :

Le PCM stocke l'énergie thermique sous forme de chaleur latente, permettant ainsi de réduire le nombre de cycles de démarrage et d'arrêt du compresseur, ce qui se traduit directement par des économies d'énergie. [52]

La quantité de chaleur stockée par le PCM est donnée par l'équation suivante :

$$\Delta H \cdot m = Q \dots\dots\dots(5)$$

Où :

Q : est l'énergie thermique stockée (J)

M : est la masse du matériau (kg)

$\Delta H$  : est l'enthalpie de fusion (J/kg)

• Amélioration du coefficient de performance (COP) :

Le coefficient de performance d'un système frigorifique peut être amélioré grâce à l'intégration des PCM/nano-PCM, car ces derniers permettent d'augmenter la quantité de froid restitué sans accroître le travail mécanique du compresseur. [52]

• Effets mesurés en conditions réelles :

Plusieurs études expérimentales et simulations numériques ont démontré les avantages de l'usage des PCM/nano-PCM dans un contexte d'usage domestique réel. Par exemple, une simulation réalisée avec le logiciel TRNSYS sur un réfrigérateur de 220 litres a donné les résultats suivants [52]

Sans PCM : 1,10 kWh/jour

Avec PCM (occupant 30 % du volume) : 0,92 kWh/jour

Avec nano-PCM : 0,84 kWh/jour

Ces résultats démontrent une amélioration de l'efficacité énergétique pouvant atteindre plus de 23 % dans le cas de l'utilisation de nano-PCM, en raison de leur meilleure conductivité thermique. [52]

• Prolongation de l'autonomie thermique :

Un autre avantage important est la capacité des PCM/nano-PCM à maintenir la température interne du réfrigérateur stable durant les périodes d'arrêt du compresseur ou en cas de coupure de courant. Ce temps d'autonomie thermique (TAT) est essentiel dans les régions où l'alimentation électrique est instable. [52]

TAT (Temps d'Autonomie Thermique) : Il s'agit de la période de temps pendant laquelle le système (par exemple, un réfrigérateur) peut maintenir une température appropriée sans fonctionner, grâce à l'énergie thermique stockée dans les matériaux PCM ou nano-PCM.

## II.11 Simulation Numérique :

Les simulations numériques de la dynamique des fluides plus souvent désignée par le terme anglais CFD (computational fluid Dynamics) est un terme générique qui désigne toutes les approches informatiques permettant de modéliser le comportement d'un fluide (liquide ou gaz) suivant un contexte défini par l'opérateur. La CFD est devenue un outil indispensable dans les sciences et la recherche scientifique et industrielles. Elles ont pour but de reproduire par le calcul le

comportement d'un système décrit par un modèle très souvent constitué d'équations aux dérivées partielles. Ces équations correspondent à la traduction mathématique de lois scientifiques. La simulation numérique renforce donc l'étude mathématique (analyse) de ces équations et de leur résolution numérique.

A l'aide du logiciel ANSYS workbench 19.0

L'un des outils utilisés pour cette étude est ANSYS 19, un logiciel de conception assistée par ordinateur (CAO) qui permet la création et la modélisation de géométries en 3D/2D, ainsi que l'application de simulations. Il permet de construire des surfaces et des volumes à partir d'une série de points définissant la géométrie de base. Une fois la géométrie créée, elle peut être exportée dans différents formats vers le générateur de maillage et les solveurs pour effectuer des analyses ou des simulations.

ANSYS 19 est un logiciel d'ingénierie mécanique qui collabore avec divers types de logiciels utilisés dans différents domaines tels que les vibrations, la mécanique des fluides, l'aérodynamique, le transfert de chaleur et la dynamique. Pour notre étude, deux composants d'ANSYS 19 sont utilisés pour effectuer le calcul aérothermique : GEOMETRY, ICEM CFD et l'analyseur FLUENT.

FLUENT est un solveur qui utilise un maillage non structuré en 2D ou 3D (avec la méthode des volumes finis). Ces maillages peuvent être des maillages triangulaires (tétraédriques en 3D) ou des maillages structurés interprétés sous forme non structurée, tels que des rectangles (hexaèdres), pour simuler les écoulements compressibles ou incompressibles, y compris des phénomènes physiques complexes tels que la turbulence, le transfert thermique, les réactions chimiques et les écoulements multiphasiques, sur des géométries industrielles.

L'analyse en 2D ou 3D démontre la capacité de FLUENT à simuler les caractéristiques de l'écoulement autour des tuyères supersoniques. Ce problème est résolu en utilisant les équations d'Euler.

## **II.12. Méthodologie outils utilisé :**

- Préparation du modèle :

Importez la géométrie dans Ansys Fluent à partir du logiciel Solidworks. Cela peut être fait à partir des fichiers au format .stp, .igs, .sat, etc.

Nettoyez et réparez la géométrie si nécessaire.

Définissez les conditions aux limites initiales et les matériaux du modèle.

- Maillage :

Générez le maillage du modèle géométrique. On peut choisir entre différents types de maillage, tels que les maillages structurés ou non structurés, en fonction de l'application.

Vérifiez la qualité du maillage pour vous assurer qu'il est adapté à notre simulation.

- Définition des modèles physiques :

Spécifiez le type de fluide, les propriétés thermiques, les propriétés du fluide, les modèles de turbulence, etc.

Si nécessaire, définissez d'autres modèles physiques spécifiques à votre application, tel que la radiation.

- Définition des conditions aux limites :

Définissez les conditions aux limites pour notre simulation, telles que les conditions d'entrée, les conditions de sortie, les conditions de paroi, etc.

- Configuration de la solution :

Configurez les options numériques, telles que la méthode de discrétisation, les schémas de résolution, etc.

Sélectionnez les paramètres de convergence, tels que les critères d'arrêt, les tolérances, etc.

- Résolution de la simulation :

Lancez la simulation et laissez ANSYS Fluent résoudre les équations physiques pour obtenir les résultats.

Suivez la progression de la convergence et vérifiez les avertissements ou les erreurs éventuels.

- Analyse des résultats :

Analysez les résultats de la simulation, tels que les champs de vitesse, de pression, de température, etc.

Utilisez les outils de post-traitement d'ANSYS Fluent pour visualiser et extraire les données pertinentes.

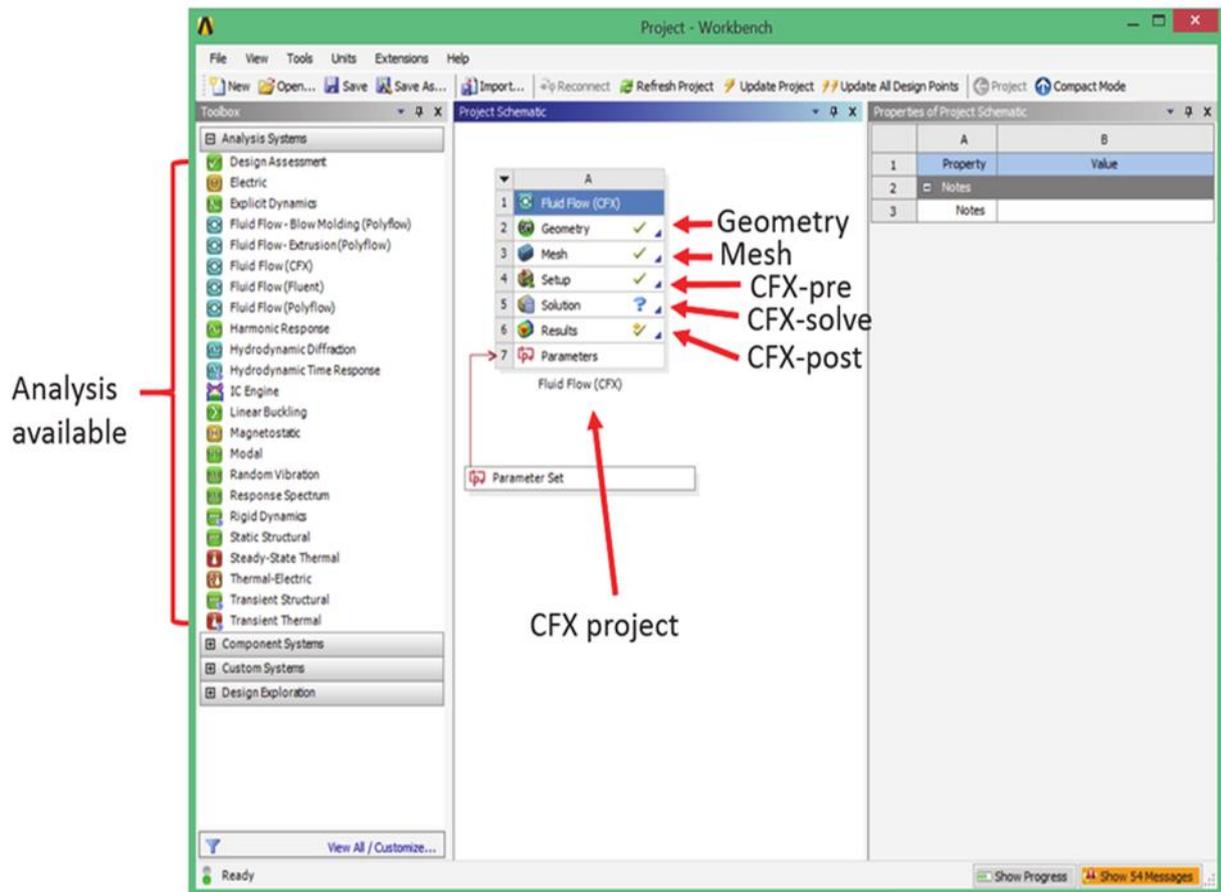


Figure 19. Fonctionnement du logiciel

## II.13 Conclusion :

Après avoir terminé le deuxième chapitre, dans lequel nous avons discuté en détail de divers aspects liés aux matériaux à changement de phase (PCM) et aux nanoparticules, en termes de types, de propriétés et d'applications, cette étude préliminaire nous a conduit à mener une série d'expériences scientifiques. Dans le troisième chapitre, ces expériences seront présentées et discutées de manière systématique.

# CHAPITRE 3

## Étude numérique et réalisation du montage expérimental

Le chapitre III est consacré à l'étude combinée des performances thermiques et énergétiques d'un système de réfrigération domestique intégrant des matériaux à changement de phase (PCM) enrichis en nanoparticules (nanoPCM). Ce chapitre débute par une présentation du logiciel ANSYS FLUENT, en détaillant les différentes étapes de conception du modèle physique, la modélisation ainsi que les conditions aux limites appliquées. Par la suite, la partie expérimentale est développée, avec une description précise des matériaux utilisés, de leur préparation et de leur incorporation dans le système de réfrigération. La conception et la mise en place d'un banc d'essais expérimental, basé sur un réfrigérateur à compression à vapeur de type No Frost, sont également présentées. Ce banc, représentatif des équipements domestiques actuels, permet de simuler des conditions réelles de fonctionnement et de mesurer avec précision les variations de température, la consommation électrique ainsi que les temps de fonctionnement du compresseur, en présence ou en l'absence des matériaux étudiés. L'association de ces deux approches, simulation numérique et expérimentation, offre une évaluation rigoureuse des bénéfices apportés par l'intégration des PCM et des nanoparticules dans les systèmes de réfrigération domestique.

### **III.1 Partie numérique :**

La définition des simulations numériques est stipulée par la procédure expérimentale. Elle doit être la plus compatible possible avec les conditions d'expérimentation pour permettre la confrontation et la validation des résultats. Ceci concerne particulièrement les conditions aux limites étudiés et le domaine géométrique sélectionné

#### **III.1.1 Présentation du modèle géométrique :**

La figure ci-dessus illustre la configuration géométrique utilisée dans notre étude numérique. Le modèle représente un congélateur composé de deux parties distinctes : la zone principale du congélateur et, à sa base, une couche de matériau à changement de phase (PCM). Cette disposition permet d'analyser l'interaction thermique entre le compartiment frigorifique et le PCM, afin d'évaluer l'effet de ce dernier sur la performance globale du système.

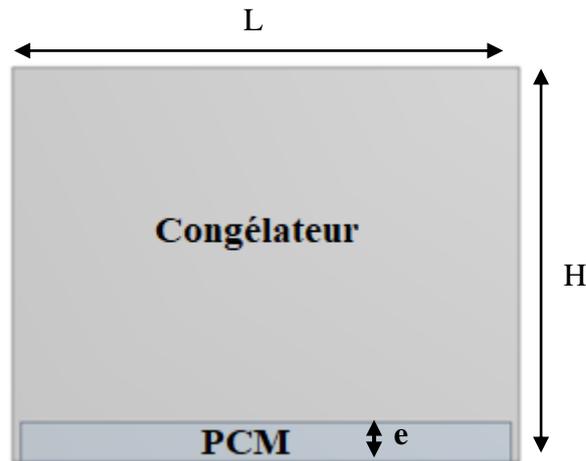


Figure 20. Schéma de la configuration géométrique du congélateur avec intégration du PCM

Les dimensions indiquées sur l'axe horizontal facilitent la compréhension de l'échelle et de la répartition spatiale des différentes zones du modèle.

Tableau 4. Dimensions géométriques des différentes parties du modèle

ÉLÉMENT	HAUTEUR (H) [CM]	LARGEUR (L) [CM]	ÉPAISSEUR (E) [CM]
CONGELATEUR	60	50	-
PCM	-	48	2

### III.1.2 Génération et qualité du maillage :

L'étape de génération du maillage consiste à discrétiser la géométrie du domaine étudié en un ensemble de cellules élémentaires, ce qui permet la résolution numérique des équations de transfert thermique. Cette phase inclut également l'identification et la nomination des différentes parties de la géométrie, afin de définir précisément les conditions aux limites du problème ainsi que les spécificités du maillage au niveau des différentes sections.

La qualité du maillage, illustrée à la Figure 2, joue un rôle crucial dans la précision et la stabilité des calculs numériques. Un maillage adapté doit prendre en compte les phénomènes physiques attendus, notamment dans les zones où de forts gradients de température ou de vitesse sont prévus, comme à l'interface entre le PCM et la zone du congélateur. C'est pourquoi une distribution plus fine des nœuds est généralement adoptée dans ces régions sensibles. Un test préliminaire, appelé étude de convergence du maillage, est indispensable pour s'assurer que les résultats numériques ne dépendent pas du niveau de raffinement du maillage.

La qualité du maillage est évaluée selon plusieurs critères, tels que la forme et la taille des éléments, le rapport de forme, la courbure ainsi que la connectivité entre les éléments. Dans notre étude, le maillage généré comprend 17 855 nœuds et 17 558 éléments, assurant ainsi un bon compromis entre précision des résultats et temps de calcul.

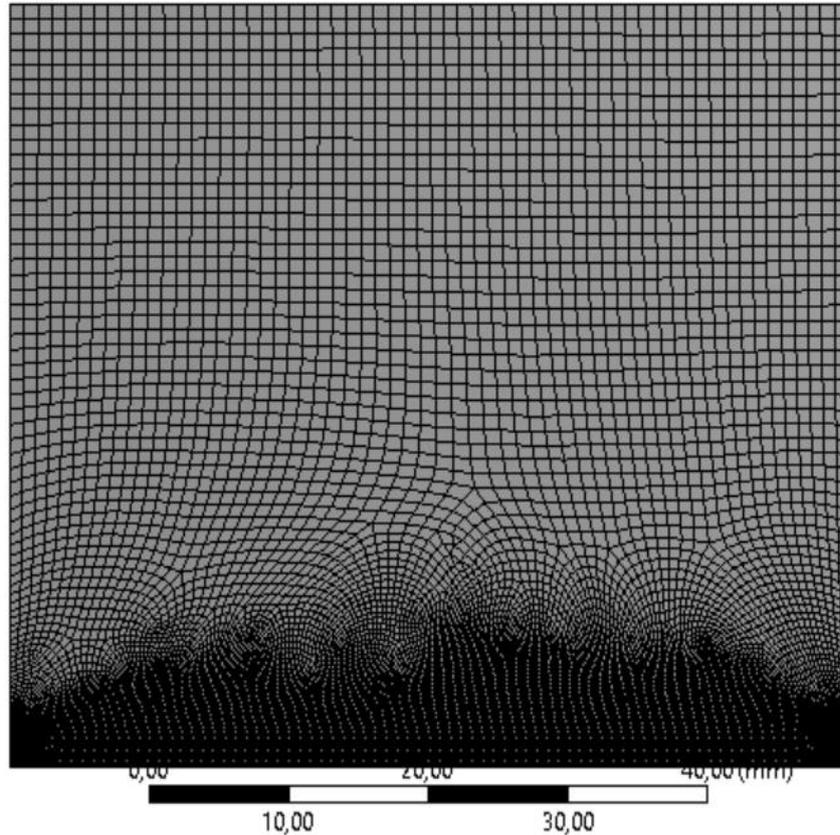


Figure 21. Maillage du domaine de simulation montrant un raffinement accru à l'interface PCM

### III.1.3 Paramétrage initial de la simulation sous ANSYS Fluent :

La figure ci-dessus illustre la fenêtre de lancement de Fluent dans ANSYS, qui apparaît après l'actualisation et la validation de l'étape de maillage. Cette interface permet de paramétrer les principales options de la simulation avant d'ouvrir l'environnement Fluent. L'utilisateur doit d'abord choisir la dimension du problème (2D ou 3D), puis spécifier s'il souhaite activer le calcul en double précision pour une meilleure exactitude numérique. Il est également possible de sélectionner le mode de traitement, soit en mode série (monoprocasseur) soit en mode parallèle pour exploiter plusieurs cœurs de calcul, ce qui peut accélérer significativement les simulations complexes.



Figure 22. Fenêtre de lancement de Fluent dans ANSYS pour le paramétrage de la simulation

### III.1.4 Configuration générale des paramètres physiques dans ANSYS Fluent :

La figure ci-dessous présente la fenêtre de configuration générale des paramètres physiques et numériques dans ANSYS Fluent, étape essentielle avant de lancer la simulation.

Dans un premier temps, il est impératif de sélectionner l'option Check dans la section « Grid », afin de vérifier la cohérence et la qualité du maillage importé. Cette vérification permet à Fluent de détecter d'éventuelles erreurs ou incohérences géométriques qui pourraient compromettre la simulation.

Ensuite, plusieurs paramètres fondamentaux doivent être définis :

- Le type de solveur est configuré en mode « Pressure-Based », adapté aux écoulements incompressibles courants dans les applications de réfrigération.
- La formulation de la vitesse est choisie en mode « Absolute ».
- Le régime temporel est réglé sur « Transient » (transitoire), ce qui permet de suivre l'évolution des phénomènes thermiques au cours du temps, indispensable pour l'étude de la solidification et de la fusion du PCM.
- L'espace de travail est défini comme « Planar » (bidimensionnel), correspondant à la géométrie du modèle étudié.
- La gravité est activée en cochant la case correspondante, avec une accélération de  $-9,8 \text{ m/s}^2$  selon l'axe Y, pour prendre en compte les effets de la pesanteur sur les transferts thermiques et les mouvements de fluide éventuels.

Ces réglages constituent une étape clé pour garantir la pertinence et la fiabilité des résultats de la simulation.

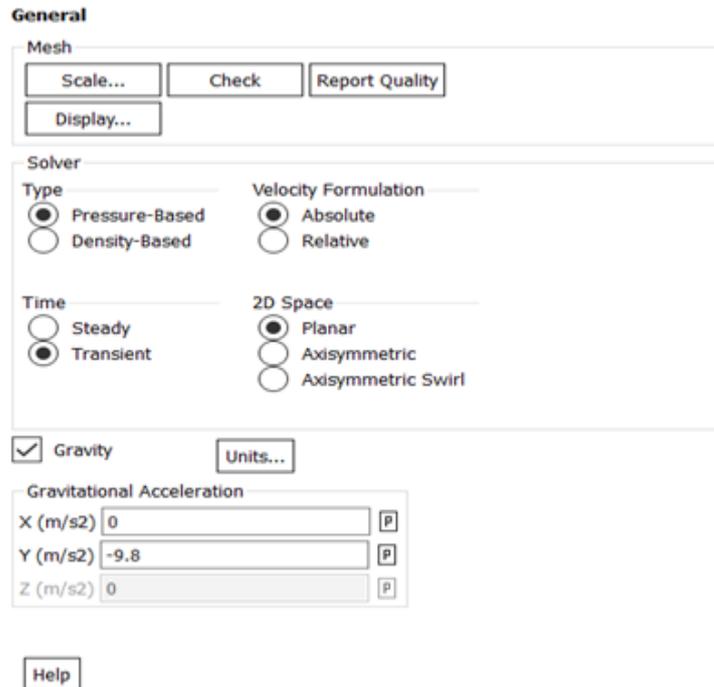


Figure 23. Fenêtre de configuration générale des paramètres physiques et numériques dans ANSYS Fluent

### III.1.5 Activation des modèles physiques dans ANSYS Fluent :

La figure ci-dessous présente la fenêtre de sélection des modèles physiques dans ANSYS Fluent, une étape essentielle pour la configuration du problème de simulation.

À ce stade, il est nécessaire d'activer les modèles correspondant aux phénomènes physiques à étudier. Dans notre cas, l'option Energy est activée afin de prendre en compte les transferts thermiques dans l'ensemble du domaine. De plus, le modèle SOLIDIFICATION & MELTING est également activé, ce qui permet de simuler les changements d'état du matériau à changement de phase (PCM) lors des processus de fusion et de solidification.

Les autres modèles, tels que « Multiphase », « Radiation », « Species » ou « Discrete Phase », restent désactivés car ils ne sont pas nécessaires pour cette étude spécifique.

L'activation judicieuse de ces modèles garantit que la simulation reproduit fidèlement les phénomènes de stockage et de restitution de chaleur liés au PCM, tout en optimisant les ressources de calcul.

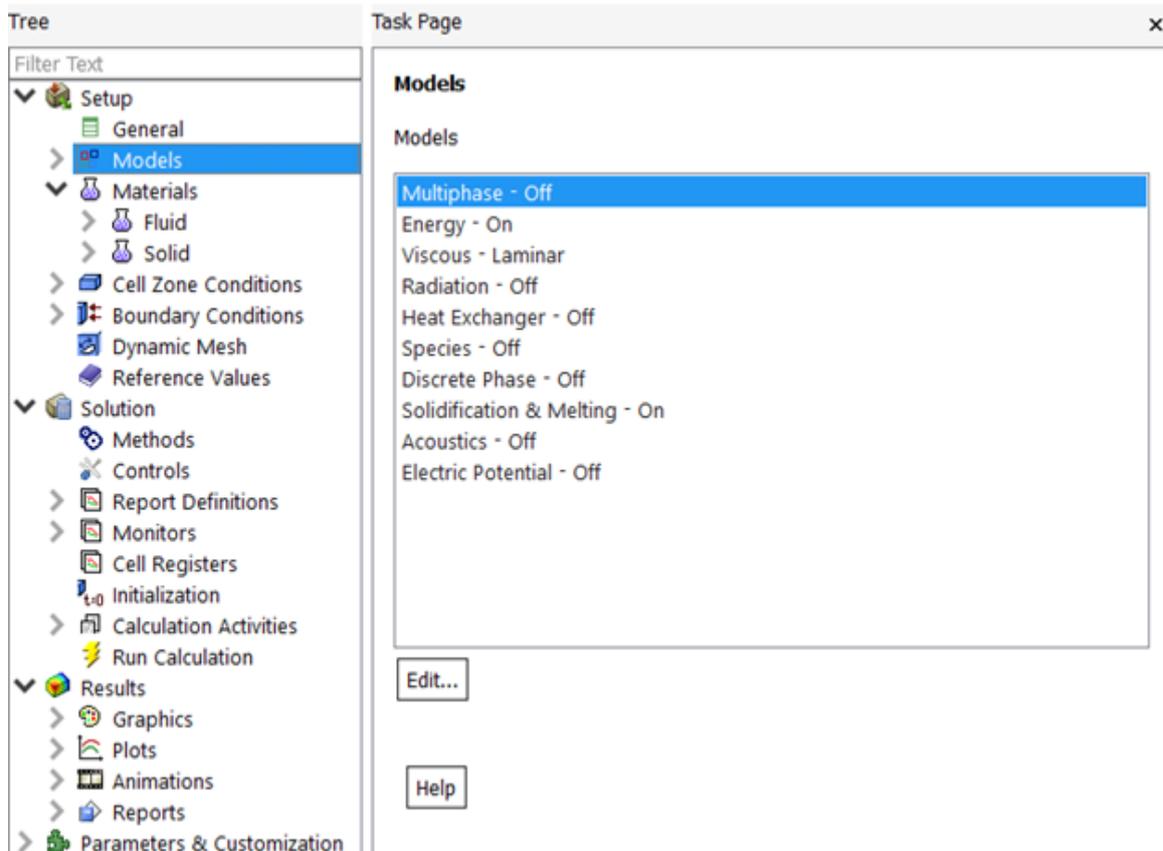


Figure 24. Fenêtre de sélection des modèles physiques dans ANSYS Fluent (activation de Energy et SOLIDIFICATION & MELTING)

### III.1.6 Définition des matériaux et de leurs propriétés physiques :

La figure ci-dessous présente la fenêtre de création et d'édition des matériaux dans ANSYS Fluent. Cette étape est cruciale car elle permet d'attribuer aux différents domaines du modèle les propriétés physiques appropriées pour chaque matériau étudié.

Dans notre cas, les propriétés du matériau à changement de phase (PCM) ainsi que celles du PCM enrichi en nanoparticules sont définies. Les paramètres essentiels incluent la masse volumique (densité), la chaleur spécifique, la conductivité thermique et la viscosité.

Ces propriétés sont saisies pour chaque configuration, allant du PCM pur jusqu'aux mélanges contenant différentes fractions de nanoparticules (de 0 % à 5 %). Cette démarche garantit une modélisation fidèle du comportement thermique et énergétique du système lors des simulations.

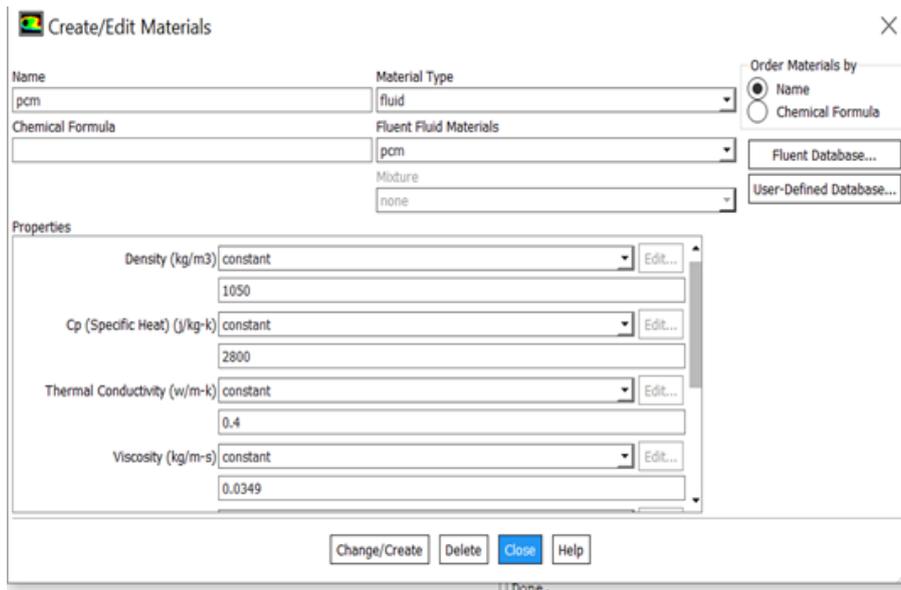


Figure 25. Fenêtre de création et d'édition des matériaux dans ANSYS Fluent (exemple pour le PCM)

Tableau 5. Propriétés physiques des matériaux utilisés dans la simulation

MATERIAU	MASSE VOLUMIQUE (KG/M <sup>3</sup> )	CHALEUR SPECIFIQUE (J/KG·K)	CONDUCTIVITE THERMIQUE (W/M·K)
PCM	1050	2800	0.6
NANO PARTICULE 1%	1100	2700	0.65
NANO PARTICULE 3%	1200	2500	0.72
NANO PARTICULE 5%	1300	2300	0.8

### III.1.7 Définition des conditions aux limites thermiques :

La figure ci-dessous présente la fenêtre de paramétrage des conditions aux limites dans ANSYS Fluent, appliquée à la zone fluide du congélateur. Cette étape est essentielle pour garantir la représentativité physique du modèle numérique.

Dans cette configuration, le matériau associé à la zone est l'air, et la température de référence du congélateur est fixée à 255 K (soit -18 °C), ce qui correspond à une condition de fonctionnement typique pour un compartiment de congélation domestique. Les vitesses d'écoulement selon les axes X et Y sont laissées à « none », indiquant l'absence de mouvement imposé dans le domaine pour cette simulation.

La prise en compte de cette température constante permet de simuler de manière réaliste l'environnement thermique auquel est soumis le matériau à changement de phase (PCM). Il est à noter que la température initiale du PCM est fixée à 298 K (soit 25 °C), ce qui permet d'étudier le processus de refroidissement, de solidification et la dynamique du transfert thermique entre le PCM et l'air du congélateur. Cette configuration est donc essentielle pour évaluer l'efficacité du stockage et de la restitution de chaleur dans le système.

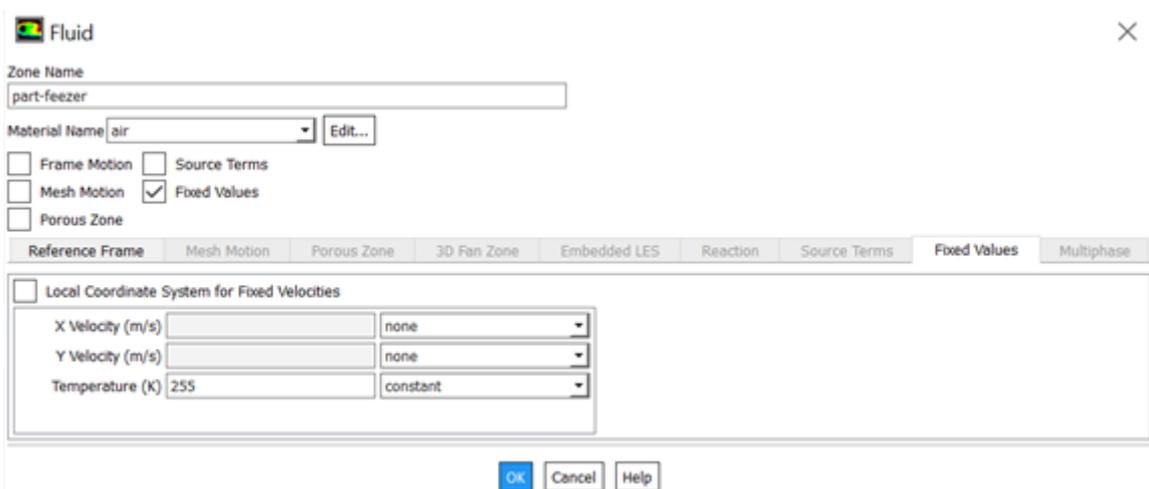


Figure 26. Fenêtre de définition des conditions aux limites thermiques dans ANSYS Fluent

### III.1.8 Configuration des méthodes de solution :

Cette étape est cruciale pour définir les méthodes numériques utilisées dans la résolution des équations de Navier-Stokes dans le cadre de la simulation. Elle permet de spécifier le couplage entre la pression et la vitesse, ainsi que les schémas de discrétisation spatiale pour chaque variable physique. Dans cette configuration, le schéma de couplage SIMPLE est utilisé pour assurer la convergence entre la pression et la vitesse. Le gradient est discrétisé selon la méthode Least Squares CELL BASED, tandis que les équations de pression, de quantité de mouvement (MOMENTUM) et d'énergie sont résolues à l'aide de schémas Second ORDER UPWIND, plus précis que les schémas d'ordre un. Cette configuration améliore la précision globale des résultats, notamment pour les simulations comportant des gradients élevés ou des zones de transition thermique.

**Solution Methods**

Pressure-Velocity Coupling

Scheme

SIMPLE

Spatial Discretization

Gradient

Least Squares Cell Based

Pressure

Second Order

Momentum

Second Order Upwind

Energy

Second Order Upwind

Figure 27. Paramètres de la méthode de solution dans ANSYS Fluent.

### III.1.9 Initialisation de la Solution

Avant de lancer les calculs, il est nécessaire d'initialiser toutes les variables physiques pour garantir une convergence rapide et stable de la solution. Cette phase permet de fournir une première estimation des champs de pression, de vitesse et de température. Dans cette configuration, l'initialisation est réalisée à partir des conditions à l'entrée du domaine (choix du champ de calcul via Compute From), avec une vitesse initiale nulle dans les directions X et Y, une pression manométrique égale à zéro, et une température initiale fixée à 298 K. Le mode Hybrid Initialisation est sélectionné pour générer un champ de solution initial plus réaliste, notamment dans les domaines complexes. Cette méthode améliore la stabilité numérique et réduit le nombre d'itérations nécessaires à la convergence.

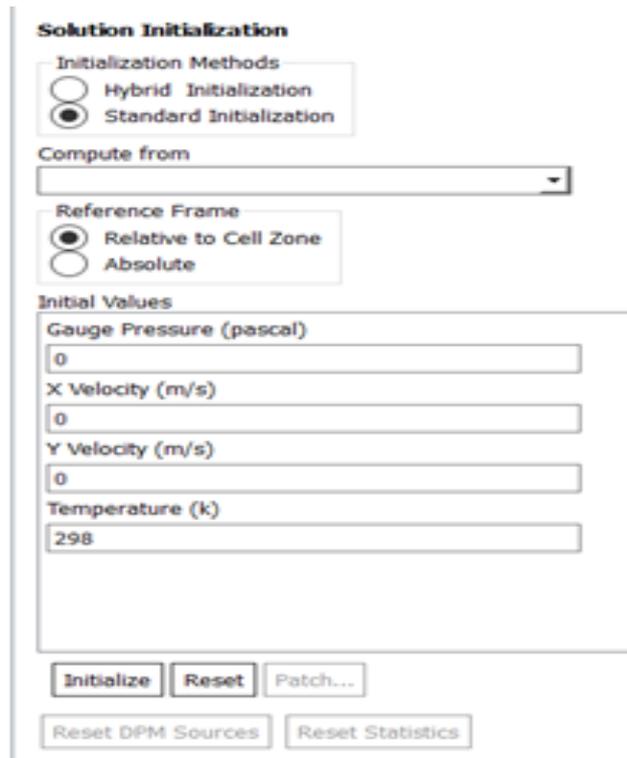


Figure 28. Paramètres d'initialisation de la solution dans ANSYS Fluent.

### III.1.10 Lancement du Calcul :

Une fois la configuration du modèle terminée, le calcul est lancé à partir de l'onglet Run Calculation. Cette étape permet de définir le nombre d'itérations par pas de temps et la durée totale de la simulation. Dans notre cas, la méthode de pas de temps est Fixe, avec une taille de pas de 1 seconde et un total de 100 pas de temps. Le nombre maximal d'itérations par pas de temps est fixé à 20, ce qui permet d'assurer une résolution suffisamment précise à chaque intervalle temporel. Le calcul est lancé en cliquant sur le bouton CALCULATE. Le solveur poursuivra les itérations jusqu'à ce que les critères de convergence soient atteints. Si la convergence n'est pas réalisée à l'issue des itérations définies, il sera nécessaire de relancer le calcul pour poursuivre vers une solution stable.

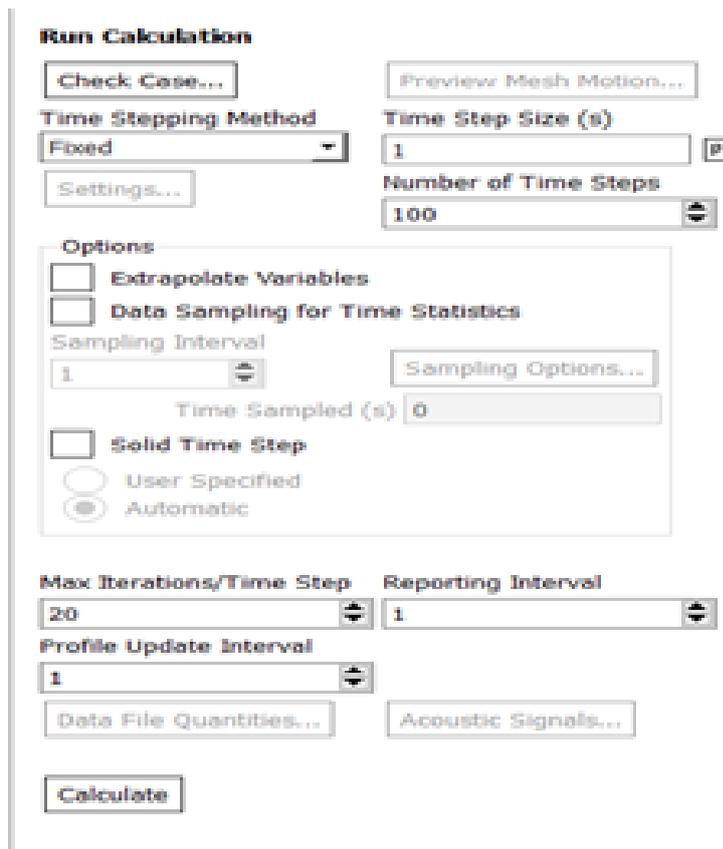


Figure 29. Paramètres de lancement du calcul transitoire dans ANSYS Fluent.

## III.2 Partie expérimentale :

Dans le cadre de cette étude, une approche expérimentale a été mise en place afin de valider les performances thermiques du système de réfrigération et d'évaluer l'impact des matériaux à changement de phase (PCM) ou nano-PCM sur le comportement thermique du réfrigérateur. L'objectif principal de cette phase expérimentale est de recueillir des données réelles sur les températures, la consommation énergétique et la stabilité thermique au sein de l'appareil. Elle permet également de comparer les résultats expérimentaux avec ceux obtenus par simulation numérique, dans une logique de validation croisée. Cette démarche expérimentale repose sur l'utilisation d'un réfrigérateur domestique instrumenté avec divers capteurs de température et d'énergie, en vue de mesurer avec précision les conditions de fonctionnement et d'identifier les améliorations potentielles apportées par l'intégration de nouveaux matériaux thermiques.

### III.2.1 Présentation du site expérimental – La maison solaire de l'UDES:

L'ensemble des expériences réalisées dans le cadre de cette étude a été conduit dans la maison solaire de l'Unité de Développement des Équipements Solaires (UDES), située à Bou Ismaïl, dans la région de

Tipaza (zone climatique A, latitude 36.00°N, longitude 65.0°E). Cette maison, d'une surface habitable de 57 m<sup>2</sup>, est spécifiquement conçue pour l'expérimentation et l'optimisation des équipements énergétiques dans des conditions réelles et contrôlées. La figure ci-dessous illustre le site expérimental : la photo (a) montre la vue extérieure de la maison solaire, tandis que la photo (b) présente l'agencement intérieur, comprenant un espace de vie moderne et fonctionnel dédié à l'accueil des dispositifs expérimentaux et à la surveillance des essais. Ce cadre permet de garantir la fiabilité et la reproductibilité des mesures effectuées lors des différentes campagnes d'expérimentation.



Figure 30. Photo de la maison solaire : (a) extérieur, (b) intérieur.

### III.2.2 Description de dispositif expérimentale :

Le système expérimental représenté sur la figure correspond à un réfrigérateur domestique mesurant 1,7 m de hauteur, 0,6 m de largeur et 0,6 m de profondeur, avec un volume total de 331 litres. L'appareil est composé de deux compartiments : un congélateur situé en haut d'une capacité de 60 litres, et un second compartiment principal offrant un volume de 221 litres. Le réfrigérateur étudié est de la marque Brandt, fabriqué en Algérie et équipé d'un affichage digital. Dans le compartiment congélateur, la température varie entre un minimum de -23°C et un maximum de -15°C.



Figure 31. Photo d'un réfrigérateur domestique

Le congélateur est de type à froid ventilé, avec des dimensions de 0,6 x 0,6 x 0,5 m, et il est muni d'une porte mesurant 0,5 m de hauteur, 0,6 m de largeur et 0,06 m profondeur. (Voir figure 32).



Figure 32. Compartiment congélateur.

Le congélateur est équipé d'un évaporateur à ailettes situé sur la surface arrière, associé à un ventilateur dont le débit d'air libre est de 2200 tr/min. Ce ventilateur aspire l'air à travers les serpentins de l'évaporateur et assure sa circulation à l'intérieur du congélateur et du réfrigérateur. (Voir figure 33).

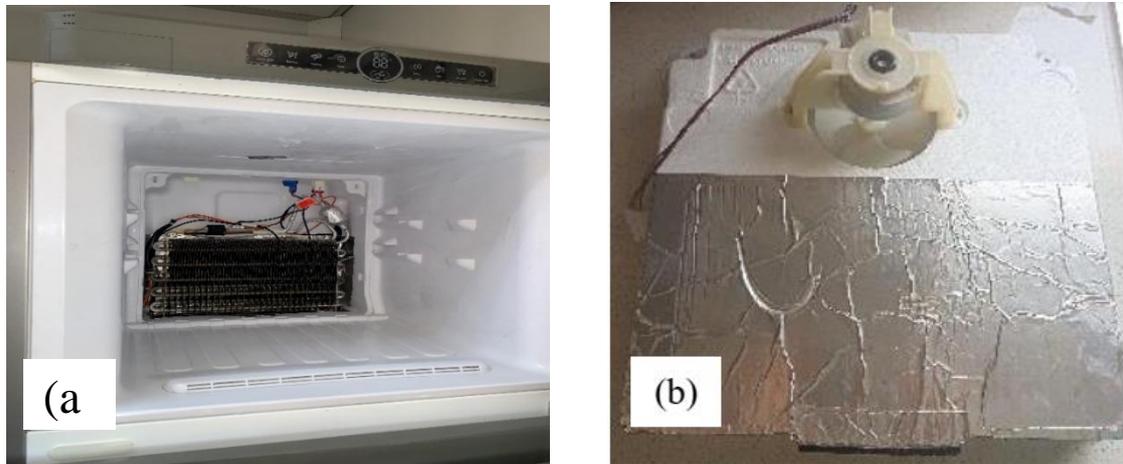


Figure 33. Photo évaporateur à ailette avec ventilation :(a) Évaporateur, (b) Ventilateur.

Le compartiment réfrigérateur est équipé de trois étagères et de deux bacs, un supérieur et un inférieur. La circulation de l'air froid dans ce compartiment est assurée par un conduit. La porte du réfrigérateur mesure 1,2 m de hauteur, 0,6 m de largeur et 6 cm d'épaisseur. Il est doté d'un compresseur de type HDL140A (profondeur (voir figure 34), fonctionnant sous une tension de 220-240V et une fréquence de 50Hz. Le réfrigérateur comprend également un condenseur intégré et un tube capillaire pour la détente (voir figure). Le fluide frigorigène utilisé dans ce réfrigérateur domestique est le R600a, avec une masse de 50 g.



Figure 34. Compresseur du réfrigérateur.

### III.2.3 Matérielle et mesure:

Dans l'étude expérimentale, l'équipement utilisé joue un rôle crucial pour obtenir des résultats précis. Le matériel employé dans cette expérience est présenté ci-dessous :

- Systèmes de mesure de la température :

Les thermocouples comptent parmi les capteurs de température les plus répandus dans le domaine industriel. En raison de leurs nombreux avantages. Voici ci-après une liste des types de thermocouples les plus utilisés ainsi que leur composition.



Figure 35. Photo de thermocouple. [40]

Le thermocouple est également un capteur particulièrement robuste. Bien qu'il ne soit pas aussi précis que les capteurs résistifs, il offre une précision suffisante pour de nombreuses applications. En outre, les thermocouples sont relativement économiques et leur circuit de mesure ne requiert pas de courant d'excitation.



Figure 36. Photos du Data Logger type Hydra 2700

Les thermocouples se déclinent en plusieurs types, chacun adapté à des usages spécifiques. Ils sont généralement désignés par une lettre unique, comme les types K, R, S, J, ou N. Dans le cadre de nos expérimentations, nous avons eu recours à des thermocouples de type K, offrant une précision d'environ  $\pm 0,5$  °C. Ces capteurs ont été utilisés notamment pour surveiller la température d'un réfrigérateur ainsi que dans les systèmes de contrôle PCM.

Tableau 6. Descriptions des différents types de thermocouple

TYPE	FIL POSITIF	FIL NEGATIF
B	70 % PLATINE	96 % PLATINE
	30 % RHODIUM	6 % RHODIUM
E	CHROMEL	CONSTANTAN
J	FER	CONSTANTAN
K	CHROMEL	ALUMEL
N	NICROSIL	NISIL
R	87 % PLATINE	PLATINE
	13 % RHODIUM	
S	90 % PLATINE	PLATINE
	10 % RHODIUM	
T	CUIVRE	CONSTANTAN

- Description du système d'acquisition de données :

Les relevés de température en fonction du temps sont effectués à l'aide d'un enregistreur de données de type Hydra 2700, Cet appareil peut gérer simultanément jusqu'à 48 thermocouples. La connexion avec l'ordinateur se fait par l'intermédiaire d'un câble de type RS232.

La figure 36 présente du data logger. La façade avant est équipée d'un écran LCD qui permet une utilisation autonome et manuelle de l'appareil. À l'arrière, on retrouve les connecteurs destinés au branchement des thermocouples ainsi qu'un port série assurant la liaison avec le micro-ordinateur. La figure suivante illustre l'interface graphique du data logger.

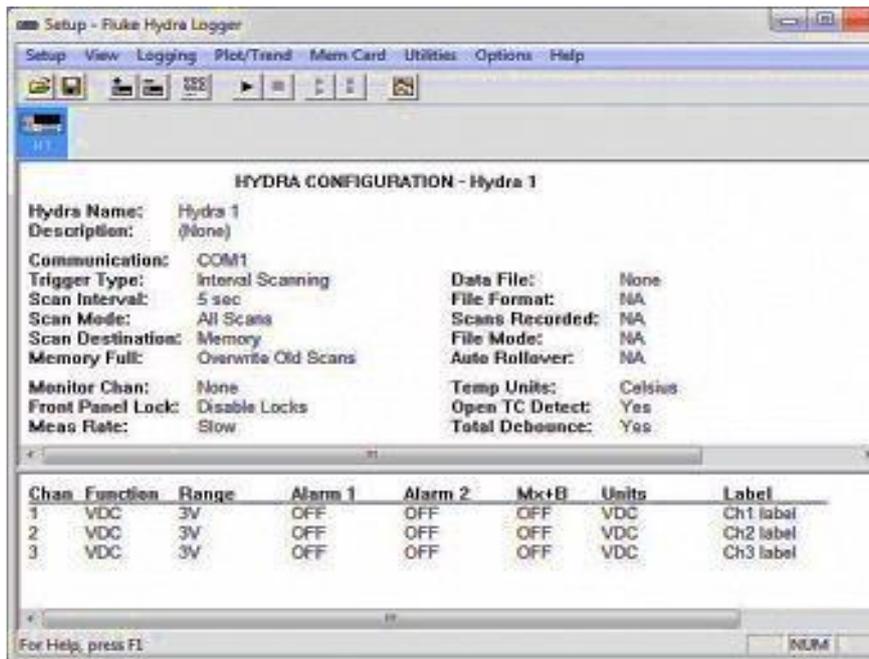


Figure 37. Interface graphique du data logger.

Après la numérisation des signaux provenant des capteurs thermocouples par le data logger, leur acquisition et leur enregistrement sont assurés par le micro-ordinateur à l'aide d'un logiciel tel qu'HyperTerminal. Les données sont ensuite sauvegardées sous forme numérique dans des fichiers de type tableur (comme Excel), comme l'illustre l'image de la figure 37.

- Systèmes de mesure de consommation d'énergie :

La mesure de la consommation d'énergie s'effectue à l'aide d'un compteur électrique, tel qu'illustré à la figure 38. Il s'agit d'un modèle de type Wechselstromzähler, fonctionnant sous une tension nominale de 230 V et capable de supporter une intensité comprise entre 10 et 40 A.



Figure 38. Photo de compteur électrique utilisée.

Ce compteur, fabriqué en Allemagne, mesure la consommation d'énergie en kilowattheures (kWh). Il est conçu pour évaluer la puissance électrique utilisée.

$$P = I \times U \dots\dots\dots (6)$$

Avec :

P : Puissance en watts (W).

I : Intensité en ampère (A)

U : Tension en volt (V).

### III.2.4 Emplacement du PCM dans le congélateur :

Le choix de l'emplacement du matériau à changement de phase (PCM) dans le congélateur est crucial pour optimiser son efficacité thermique. En effet, le PCM stocke et libère de l'énergie thermique lors de ses transitions de phase, ce qui permet de stabiliser la température intérieure. Pour maximiser cet effet, le PCM doit être positionné dans des zones où la vitesse de l'air est relativement élevée. Cela favorise un échange convectif plus intense entre l'air froid circulant et le PCM, accélérant ainsi la charge (solidification) et la décharge (fusion) thermique du matériau (Voir figure 38).

Dans cette expérience, 1 kg de propylène glycol à 30 % a été utilisé comme PCM. Ce choix est motivé par son point de changement de phase proche de -15 °C, ce qui correspond bien aux températures de fonctionnement du congélateur. Le PCM a été placé stratégiquement dans une zone du congélateur où le flux d'air est le plus important, généralement à proximité de la sortie du ventilateur ou dans le chemin direct du courant d'air froid.

Le congélateur a été réglé à une température cible de -18 °C. Lors du fonctionnement du compresseur, la température intérieure descend jusqu'à environ -20 °C, ce qui permet au PCM de se solidifier et de stocker de l'énergie frigorifique. Lorsque le compresseur s'arrête, la température remonte progressivement jusqu'à environ -15 °C, température à laquelle le PCM commence à fondre, restituant ainsi la fraîcheur accumulée et contribuant à limiter la hausse de température dans le congélateur. Ce phénomène permet d'améliorer la stabilité thermique et de réduire les cycles de démarrage/arrêt du compresseur, optimisant ainsi la consommation énergétique.



Figure 39. Emplacement des matériaux à changement de phase (PCM) à l'intérieur du congélateur

### III.2.5 Procédure d'expérimentation :

Les données expérimentales ont été recueillies à partir d'un banc d'essai conçu pour simuler les conditions de fonctionnement d'un réfrigérateur domestique. La température du congélateur a été maintenue constante à  $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ , tandis que la température du compartiment réfrigérateur a été réglée successivement à  $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Ces réglages permettent d'étudier l'impact des variations de température dans le compartiment principal sur les performances globales de l'appareil. L'environnement ambiant a été contrôlé et maintenu à  $22 \pm 1,5\text{ }^{\circ}\text{C}$  afin de reproduire des conditions standards d'utilisation intérieure (Voir figure 38).

Pour assurer un suivi précis et continu des paramètres thermiques, un système d'acquisition de données a été mis en place. Ce système est connecté à un ordinateur via une interface graphique dédiée, permettant à la fois l'affichage en temps réel des mesures et l'enregistrement automatique des données. Les relevés ont été effectués à intervalles réguliers de 60 secondes, garantissant une résolution temporelle suffisante pour analyser les variations de température et le comportement thermique du banc d'essai.

Cette méthodologie rigoureuse permet de collecter des données fiables et exploitables pour évaluer la performance énergétique et la stabilité thermique du réfrigérateur dans différentes conditions de charge thermique.



Figure 40. Vue du banc d'essai utilisé pour étudier le comportement thermique et la régulation du réfrigérateur domestique

### III.2.6 Emplacement des thermocouples :

Le suivi des différents essais a été assuré à l'aide de 10 thermocouples de type K, choisis pour leur large plage de mesure et leur précision adaptée aux températures rencontrées dans un réfrigérateur domestique.

Tableau 7. Emplacement de thermocouple

THERMOCOUPLE 1	ENTRE CONDENCEUR
THERMOCOUPLE 2	SORTIE CONDENCEUR
THERMOCOUPLE 3	ENTRE EVAPORATEUR
THERMOCOUPLE 4	SORTIE EVAPORATEUR
THERMOCOUPLE 5	CONGELATEUR
THERMOCOUPLE 6	ETAGE 1 HAUT
THERMOCOUPLE 7	ETAGE 2 MILIEU
THERMOCOUPLE 8	ETAGE 3 BAS
THERMOCOUPLE 9	EMBIANTE EXTERIEUR
THERMOCOUPLE 10	PCM

La figure 41 illustre la disposition précise de ces thermocouples à l'intérieur de l'appareil.

- Condenseur :

Deux thermocouples sont installés sur le condenseur : le thermocouple T1 est placé à l'entrée, tandis que le T2 est positionné à la sortie du condenseur. Cette configuration permet de mesurer la variation de température du fluide frigorigène dans cette partie du circuit.

- Compartiment congélateur :

Trois thermocouples y sont installés. Deux d'entre eux sont fixés directement sur l'évaporateur : le thermocouple T3 est positionné à l'entrée du flux d'air froid, tandis que le T4 est placé à la sortie. Le troisième, identifié par T5, est situé dans l'espace intérieur du congélateur afin de mesurer la température ambiante à l'intérieur du compartiment.

- Compartiment réfrigérateur :

Trois thermocouples ont été répartis dans le compartiment réfrigérateur pour assurer une surveillance précise de la température à différents niveaux. Les thermocouples T6, T7 et T8 sont placés respectivement aux premier, deuxième et troisième étages du compartiment. Cette répartition permet de suivre les gradients thermiques verticaux et d'évaluer l'homogénéité de la température.

- Ambiant extérieur :

Un seul thermocouple, le T9, est dédié à la mesure de la température ambiante extérieure au réfrigérateur. Il permet de s'assurer que la température ambiante reste stable et ne dépasse pas 23 °C, garantissant ainsi la reproductibilité des essais.

- Matériaux à changement de phase (PCM) :

Deux thermocouples sont insérés dans les pour suivre leur comportement thermique. Le thermocouple T10 est installé dans le PCM contenant du propylène glycol à 35 %. Ces mesures sont essentielles pour analyser les performances des matériaux en termes de stockage et restitution de froid

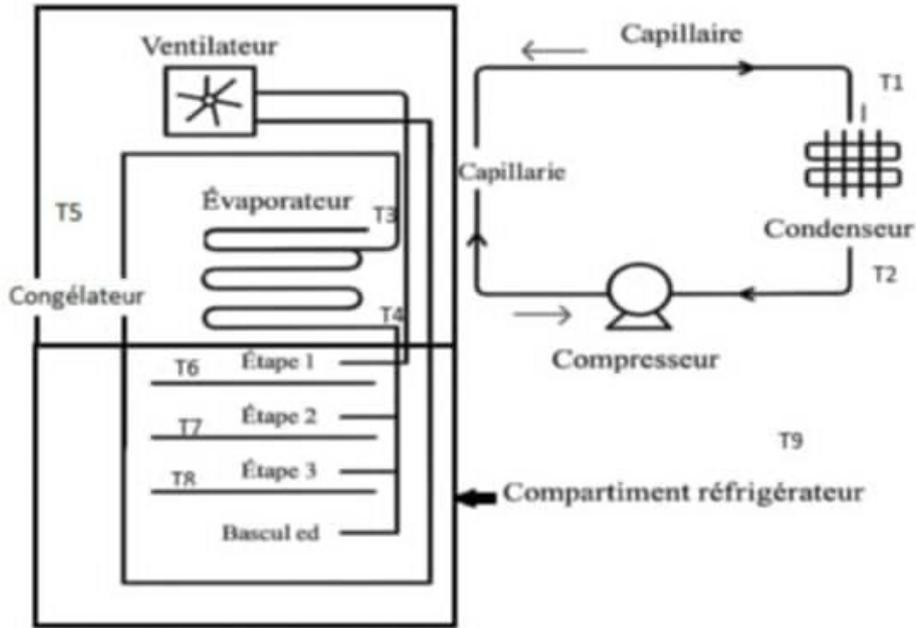


Figure 41. Photo des thermocouples installés dans le réfrigérateur

### III.2.7 Préparation de nano PCM:

La sélection et la préparation des nanoparticules, suivies de leur dispersion dans le fluide de base PCM, constituent des étapes fondamentales dans cette étude. Les nanoparticules de dioxyde de titane ( $\text{TiO}_2$ ) utilisées ont été fournies par BIOCHEM Chemo Pharma Algérie.

Sélection de la nanoparticule :

Dans le cadre de notre étude sur l'intégration de nanoPCM dans un congélateur, la conductivité thermique du matériau à changement de phase est un paramètre clé pour améliorer l'efficacité énergétique du système. L'incorporation de nanoparticules dans le PCM de base permet d'augmenter sa conductivité thermique proportionnellement à la fraction volumique des nanoparticules.

Le choix des nanoparticules repose sur plusieurs critères essentiels :

- Disponibilité locale
- Faible coût
- Conductivité thermique élevée
- Bonne stabilité en suspension
- Faible tendance à l'agglomération

Conformément à ces exigences, l'oxyde de titane ( $\text{TiO}_2$ ) a été sélectionné pour cette étude. Les caractéristiques principales des nanoparticules de  $\text{TiO}_2$  utilisées sont résumées dans le tableau ci-dessous :

Tableau 8. Propriété de nanoparticule du TiO<sub>2</sub> [59]

PROPRIETES	NANOPARTICLE
DIAMETRE MOYEN, DP	48 NM
THERMAL CONDUCTIVITY, K	8,4 W/M K
CHALEUR SPÉCIFIQUE, C <sub>p</sub>	710 J/KG K
DENSITÉ, $\rho$	4157 KG /M <sup>3</sup>
PURETE	99.5 (%)
SURFACE SPECIFIQUE	4.61 M <sup>2</sup> /G

Méthodes de préparation du nanoPCM :

La préparation du nanoPCM consiste à disperser uniformément les nanoparticules dans le PCM de base (Voir figure 42). Cette étape doit garantir une distribution homogène, une stabilité à long terme et un mélange efficace, sous des conditions environnementales contrôlées.

Les méthodes de préparation des nanoPCM sont généralement classées en deux catégories selon le nombre d'étapes impliquées :

- Méthode en une étape : synthèse et dispersion simultanées (non utilisée ici)
- Méthode en deux étapes : fabrication des nanoparticules puis dispersion dans le fluide de base

La méthode en deux étapes, la plus couramment utilisée, consiste d'abord à préparer les nanoparticules, puis à les disperser dans le PCM de base. Dans notre cas, les nanoparticules de TiO<sub>2</sub> ont été introduites dans un mélange eau–propylène glycol (PCM de base) par dispersion mécanique. Les techniques employées pour assurer une bonne dispersion sont :

- Agitation ultrasonique
- Agitation magnétique intense

Le schéma de cette méthode est illustré à la figure.

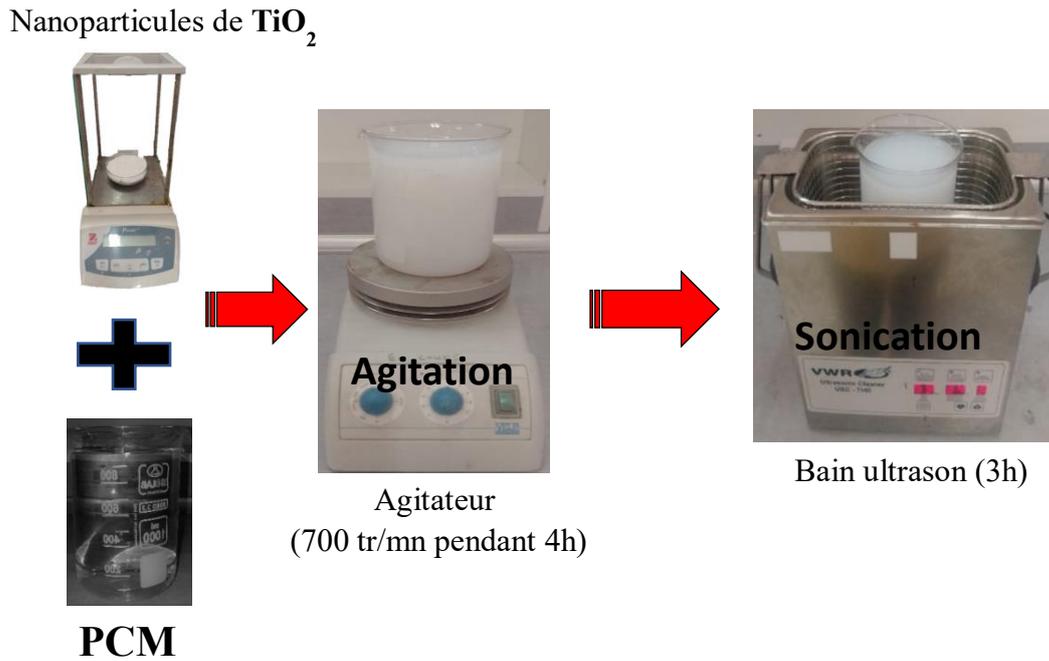


Figure 42. Préparation des nanoPCM en utilisant la méthode en deux étapes.

Dans notre préparation expérimentale, deux concentrations ont été considérées :

- Un témoin à 0 % (PCM pure)
- Une concentration à 5 % de nanoparticules

La dispersion a été réalisée à l'aide d'un agitateur magnétique (figure41), fonctionnant à 700 tours/minutes pendant 3 à 4 heures. Cette procédure a permis d'éviter toute précipitation significative des nanoparticules pendant les tests après préparation.

- Caractérisation des propriétés thermo physiques :

Les propriétés thermo physiques du nanofluide telles que la densité ( $\rho$ ), la capacité thermique ( $C_p$ ), la viscosité dynamique ( $\mu_f$ ) et la conductivité thermique ( $k$ ) sont évaluées en utilisant les corrélations proposées qui sont définies comme suit [53-56] :

- Pour la densité du nanoPCM :

$$\rho_{\text{nf}} = \phi \rho_{\text{np}} + (1 - \phi) \rho_{\text{bf}} \dots \dots \dots (7)$$

- Pour la capacité thermique du nanoPCM :

$$C_{\text{Pnf}} = \frac{\phi \rho_{\text{np}} C_{\text{Pnp}} + (1 - \phi) \rho_{\text{bf}} C_{\text{Pbf}}}{\rho_{\text{nf}}} \dots \dots \dots (8)$$

- Pour la viscosité du nanoPCM est calculée par l'équation 18 représentant la formule empirique du modèle de Brinkman :

$$\mu_{nf} = \frac{\mu_{nf}}{(1 - \phi)^{2.5}} \dots \dots \dots (9)$$

- Pour la conductivité thermique des nanoPCM :

$$k_{nf} = k_{bf} \left[ \frac{k_{np} + (n - 1)k_{bf} - (n - 1)\phi(k_{bf} - k_{np})}{k_{np} + (n - 1)k_{bf} + \phi(k_{bf} - k_{np})} \right] \dots \dots \dots (10)$$

Où, n = 3 pour une nanoparticule de forme sphérique.

### III.3 Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons étudié les performances d'un système de réfrigération intégrant des matériaux à changement de phase (PCM) et des nanoparticules, à travers des simulations numériques et des essais expérimentaux. Les résultats ont montré une amélioration de l'efficacité énergétique et une meilleure stabilité thermique. Ces conclusions nous amènent à approfondir, dans le chapitre suivant, l'analyse des résultats obtenus et à proposer des recommandations pour l'optimisation future du système C'est ce que nous allons apprendre au chapitre quatre.

# CHAPITRE 4

## Résultat et discussion

Le chapitre IV est consacré à la présentation et à l'analyse des résultats numériques et expérimentaux obtenus au cours de cette étude. Dans un premier temps, nous exposons les résultats issus des simulations numériques, en mettant en avant l'influence de l'ajout de nanoparticules de  $\text{TiO}_2$  à différentes concentrations sur le comportement thermique du matériau à changement de phase (PCM). Les profils de température, les distributions thermiques et les évolutions temporelles sont analysés en détail afin de mieux comprendre les mécanismes de transfert de chaleur dans le système étudié. Dans un second temps, les résultats expérimentaux sont présentés, permettant ainsi d'évaluer l'influence du PCM pur et du nanoPCM (PCM enrichi en nanoparticules de  $\text{TiO}_2$ ) sur la consommation électrique d'un réfrigérateur. Cette partie met en lumière l'impact des matériaux à changement de phase sur l'efficacité énergétique de l'appareil, en comparant la réduction de la consommation électrique liée à l'intégration des différents types de PCM.

#### **IV.1 Résultats numérique :**

Cette section présente une analyse approfondie des résultats issus des simulations numériques réalisées dans le cadre de cette étude. Elle met en évidence le comportement thermique du matériau à changement de phase (PCM) enrichi en nanoparticules de  $\text{TiO}_2$ , en s'intéressant particulièrement à l'évolution des profils de température lors de la solidification. L'étude porte notamment sur la température initiale la plus basse du domaine, correspondant à celle du congélateur, ainsi que sur la température la plus élevée du PCM à l'état initial, d'environ 298 K, afin d'évaluer la vitesse de refroidissement en présence des nanoparticules de  $\text{TiO}_2$ .

##### **IV.1.1 Profils de température à $t = 0$ s :**

À l'instant initial, correspondant à  $t = 0$  s, le système est dans un état thermique parfaitement homogène. La température dans l'ensemble du domaine est fixée à 255 K, valeur imposée par la source froide, représentant le congélateur dans cette simulation. Cette température uniforme s'étend sur la totalité du domaine, que ce soit pour le matériau à changement de phase pur (PCM sans nanoparticules) ou pour les nanoPCM contenant respectivement 1 %, 3 % et 5 % de nanoparticules de dioxyde de titane ( $\text{TiO}_2$ ). À ce stade précis, aucune dynamique thermique n'a encore pu se développer, car le transfert de chaleur nécessite du temps pour s'établir sous forme de conduction à partir de la base chauffée vers le reste du matériau.

Toutefois, il convient de noter une élévation de température localisée dans une très fine couche à la base du domaine, en contact immédiat avec la source de chaleur, qui atteint 298 K. Cette élévation est strictement confinée à cette région de contact, sur une épaisseur de l'ordre de quelques millimètres. Elle

s'explique par la réponse instantanée du matériau à l'application du flux thermique à la base. Ce phénomène reste cependant local et n'a pas encore diffusé dans le reste du matériau, que ce soit pour le PCM pur ou les différentes concentrations de nanoPCM. La distribution thermique globale reste donc homogène, avec un volume entièrement à 255 K, et aucune variation notable n'est encore enregistrée ailleurs.

En conclusion, à  $t = 0$  s, l'ensemble des configurations étudiées présente un état thermique identique et stable. Seule la fine couche en contact avec la source atteint 298 K, alors que le reste du volume demeure uniformément à 255 K, quel que soit le taux de nanoparticules intégré. Il est donc logique et attendu qu'à ce stade, aucune différence n'apparaisse entre le PCM pur et les nanoPCM, les propriétés de conduction thermique n'ayant pas encore pu s'exprimer dans la dynamique du système. La suite de l'analyse aux instants ultérieurs sera nécessaire pour apprécier l'effet différentiel des nanoparticules sur la propagation thermique et l'homogénéisation des températures dans le matériau.

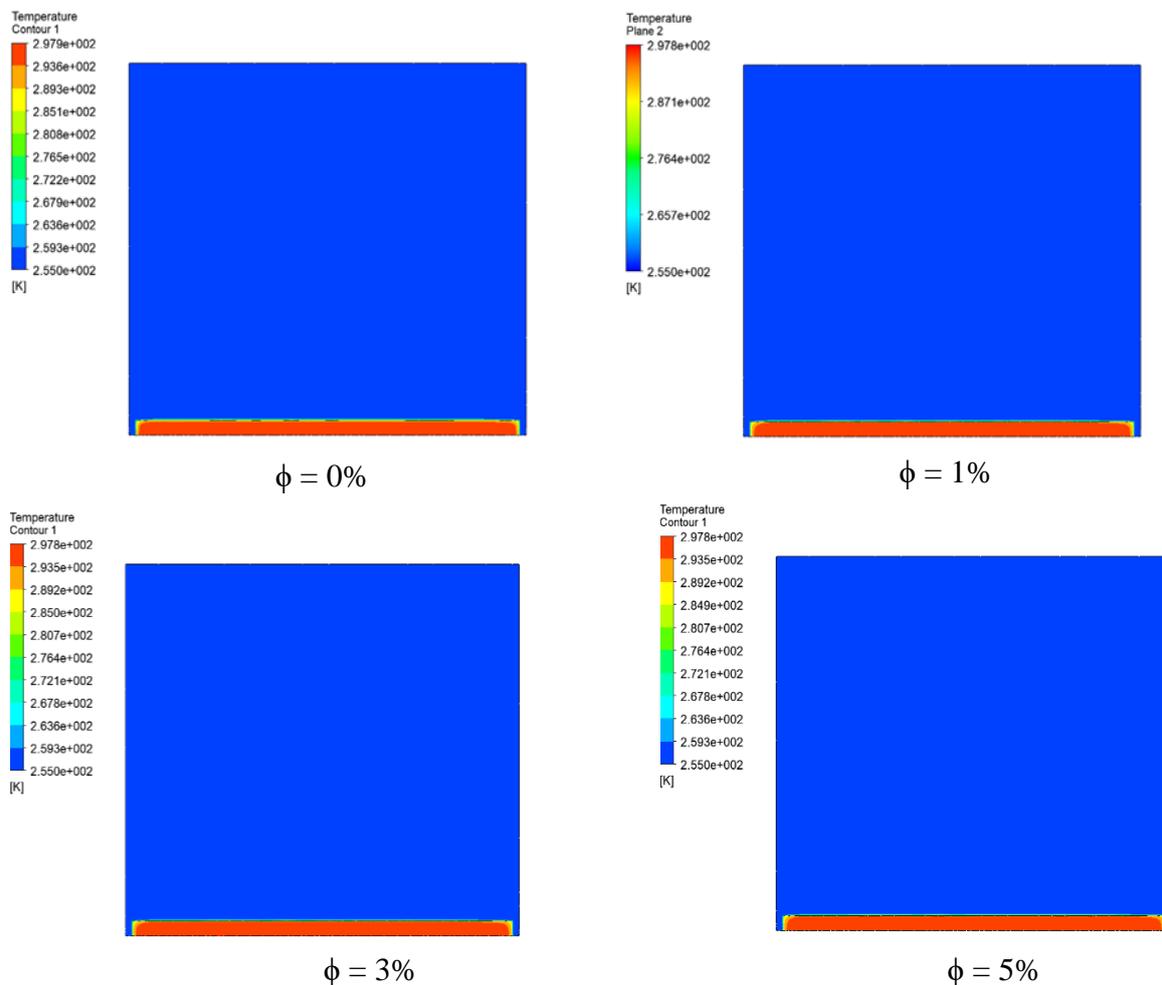


Figure 43. Profils de température à l'instant initial ( $t = 0$  s) dans un PCM avec différentes concentrations volumiques de nanoparticules de  $\text{TiO}_2$  (0 %, 1 %, 3 % et 5 %).

#### IV.1.2 Profils de température à $t = 20$ s :

À  $t = 20$  s, le système commence à s'extraire progressivement de son état thermique initial homogène. La chaleur issue de la source à la base du domaine se diffuse désormais de manière perceptible dans les différentes configurations de matériau. Les premiers gradients thermiques apparaissent, traduisant l'amorce effective du phénomène de conduction thermique. Dans le cas du PCM pur, la progression de la chaleur reste lente et peu étendue. Seule une mince zone à la base, représentant environ 10 à 15 % de la hauteur du domaine, atteint des températures comprises entre 265 K et 270 K. Cette élévation modeste reste limitée aux couches inférieures, tandis que la partie supérieure du domaine demeure inchangée, proche de 255 K, témoignant de la très faible conductivité thermique intrinsèque du PCM, qui peine à transmettre la chaleur en profondeur sur des intervalles de temps courts.

À partir de cette même échéance, l'effet des nanoparticules de  $\text{TiO}_2$  commence à se manifester de façon mesurable dans les configurations de nanoPCM. Pour une concentration de 1 %, la chaleur se propage davantage vers le haut du domaine, atteignant environ 20 à 25 % de la hauteur totale, avec des températures dans la zone intermédiaire avoisinant 270 K à 275 K. Ce léger gain en performance thermique s'explique par l'augmentation modeste de la conductivité thermique effective due à l'ajout de nanoparticules, qui commencent à jouer leur rôle en favorisant des transferts thermiques plus rapides entre les molécules de nanoPCM.

L'écart devient nettement plus significatif pour le nanoPCM à 3 %, où la propagation thermique atteint environ 40 % du domaine, avec des températures dans la partie inférieure comprises entre 275 K et 280 K. Le front thermique remonte de manière plus fluide et régulière, avec une atténuation des gradients verticaux par rapport aux cas précédents. Enfin, dans le cas du nanoPCM à 5 %, la diffusion de la chaleur est particulièrement efficace. En seulement 20 secondes, la chaleur s'étend à plus de 55 % du domaine, avec des températures dans la moitié inférieure dépassant 280 K, et des valeurs atteignant 285 K localement. Le gradient thermique est ainsi nettement moins prononcé, et les isothermes tendent à se rapprocher horizontalement, témoignant d'une distribution de chaleur bien amorcée.

L'énergie thermique, réduisant la résistance thermique interne du matériau et accélérant la progression du front thermique.

En conclusion, à  $t = 20$  s, le rôle des nanoparticules commence à se faire sentir. Le PCM pur montre une progression thermique marginale et localisée, tandis que le nanoPCM à 1 % présente une amélioration modeste. Les configurations à 3 % et 5 % affichent des performances

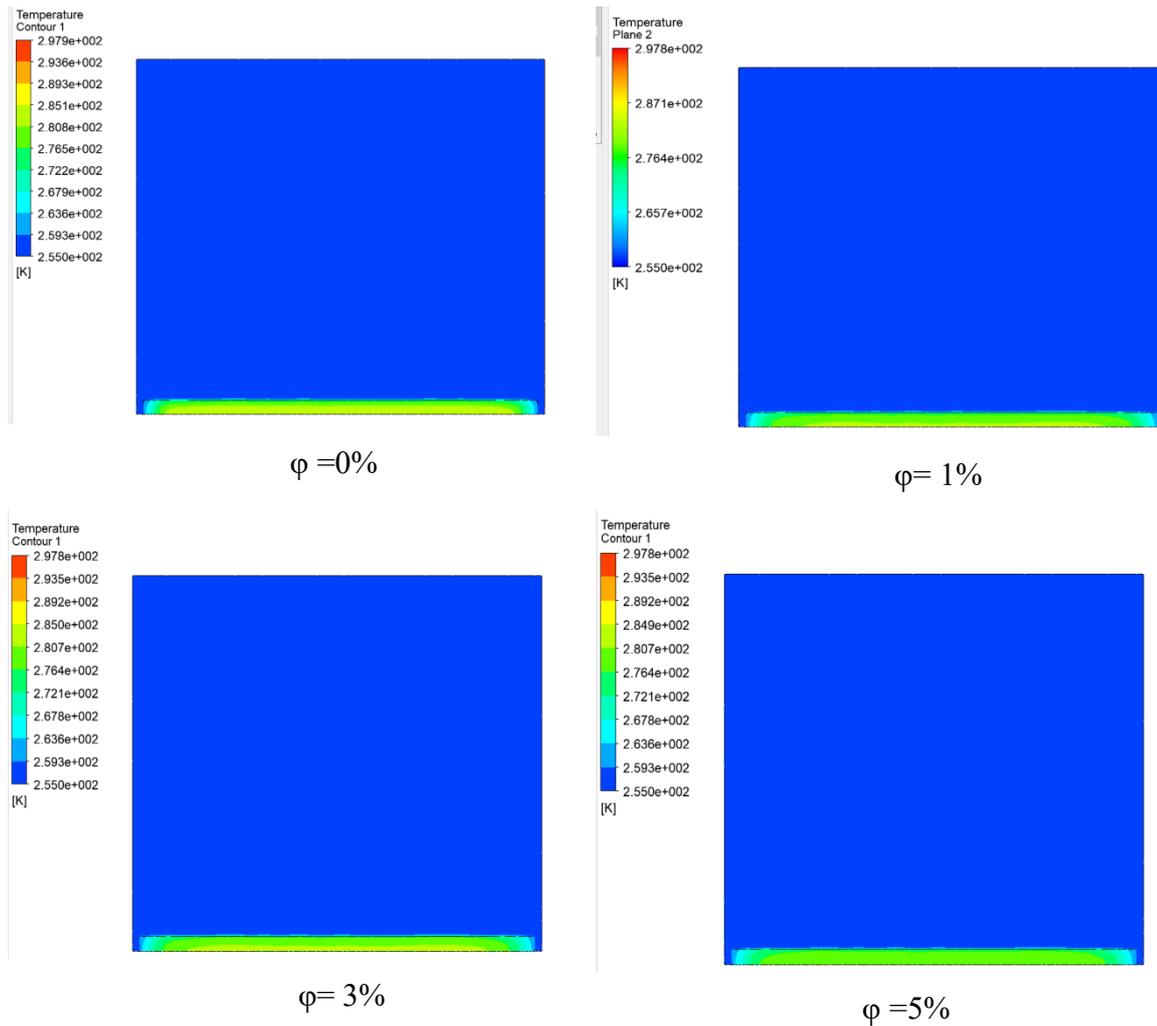


Figure 44. Profils de température à l'instant ( $t = 20$  s) dans un PCM avec différentes concentrations volumiques de nanoparticules de  $\text{TiO}_2$  (0 %, 1 %, 3 % et 5 %).

Thermiques nettement supérieures, avec une propagation thermique deux à trois fois plus étendue et des températures déjà comprises entre 280 K et 285 K dans les zones inférieures. Ces premiers écarts confirment la tendance attendue : plus la concentration en nanoparticules est élevée, plus la montée en température est rapide et homogène

#### IV .1. 3 Profils de température à $t = 40$ s :

À  $t = 40$  s, la dynamique thermique au sein du domaine étudié devient nettement plus significative. Le processus de conduction s'est intensifié, entraînant une propagation plus prononcée de la chaleur à partir de la source située à la base. Les différences de comportement thermique entre le PCM pur et les

nanoPCM deviennent à ce stade particulièrement perceptible et confirment la montée en puissance de l'effet des nanoparticules sur l'efficacité du transfert thermique. Dans le cas du PCM pur, la diffusion thermique reste encore relativement lente. Environ 50 % de la hauteur du domaine présente désormais des températures supérieures à 265 K, mais la température dans la moitié supérieure du volume demeure largement inférieure à 260 K. Le gradient thermique vertical est donc toujours marqué, traduisant la faible capacité du PCM pur à répartir efficacement la chaleur sur une courte période.

Dans le cas du nanoPCM contenant 1 % de  $\text{TiO}_2$ , une amélioration modeste est constatée. La température dans les zones intermédiaires atteint environ 275 K, avec une propagation thermique couvrant près de 60 à 65 % de la hauteur totale du domaine. Toutefois, malgré cette amélioration par rapport au PCM pur, la partie supérieure reste encore à une température proche de 260 K, et le front thermique présente une courbure accentuée qui trahit une propagation encore partiellement freinée. Le passage à une concentration de 3 % produit un effet nettement plus marqué. La moitié inférieure du domaine affiche des températures comprises entre 280 K et 285 K, et la progression thermique atteint environ 75 % de la hauteur totale. Les isothermes se sont espacées et la transition entre les différentes zones thermiques devient plus progressive, révélant une nette réduction du gradient thermique vertical et une répartition de la chaleur plus homogène.

Enfin, le cas du nanoPCM à 5 % illustre pleinement l'intérêt des nanoparticules à forte concentration. À ce stade, plus de 80 % du domaine présente des températures comprises entre 290 K et 295 K. La propagation thermique est rapide et presque uniforme, ne laissant subsister qu'une mince couche supérieure, représentant 5 à 10 % du volume, qui conserve des températures inférieures à 270 K. Les isothermes sont devenues sensiblement parallèles, indiquant un front thermique élevé et un gradient atténué.

En résumé, à 40 secondes, le rôle des nanoparticules dans l'amélioration du transfert thermique est incontestable. Si le PCM pur reste lent et peu réactif, le nanoPCM à 1 % montre une amélioration visible mais limitée. Le 3 % assure une propagation thermique très satisfaisante et le 5 % se démarque par sa montée en température rapide et homogène sur la quasi-totalité du domaine. Les différences de température sont déjà considérablement réduites et la dynamique thermique du système devient très favorable dans les configurations enrichies.

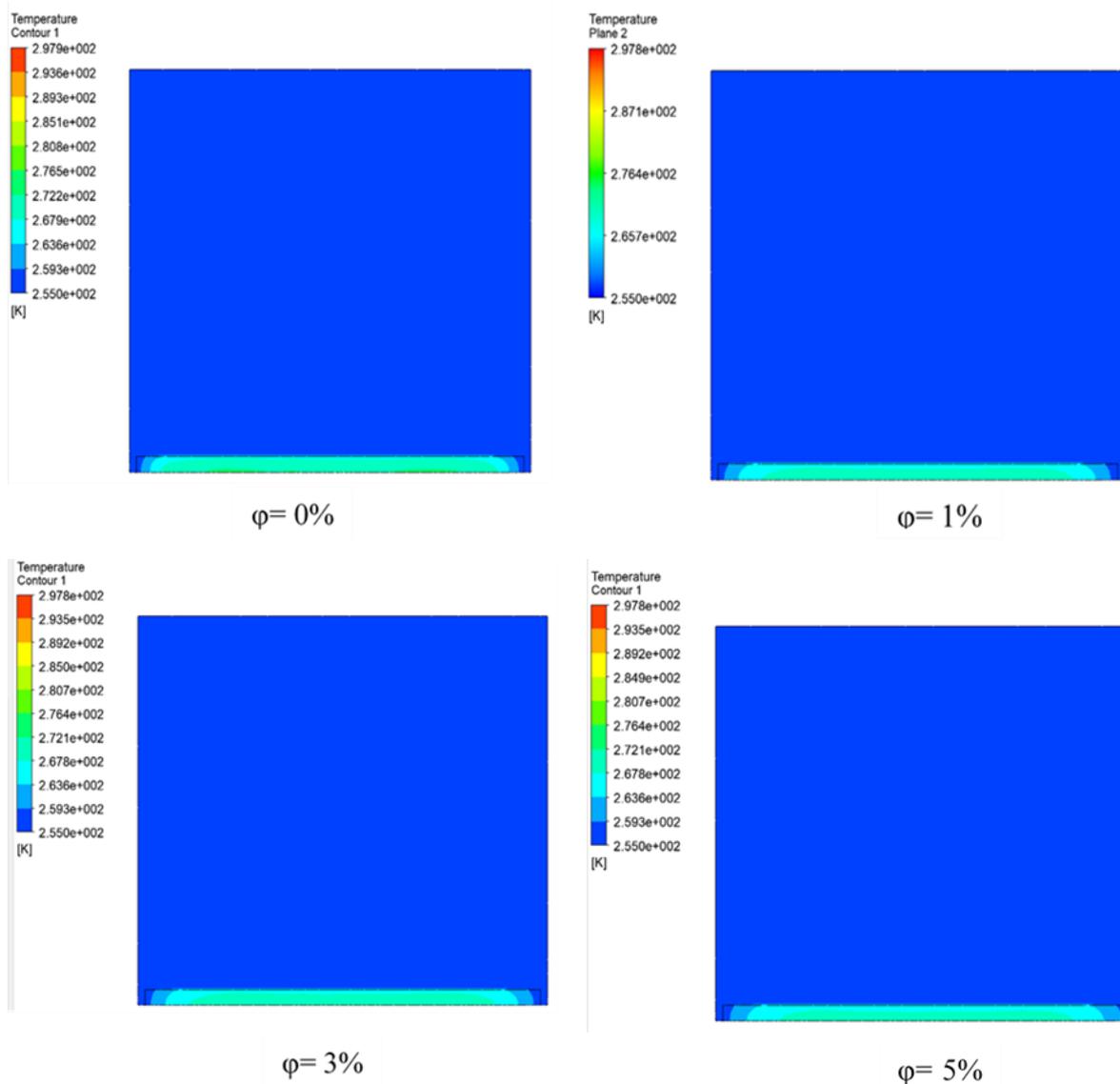


Figure 45. Profils de température à l'instant ( $t = 40$  s) dans un PCM avec différentes concentrations volumiques de nanoparticules de  $\text{TiO}_2$  (0 %, 1 %, 3 % et 5 %).

#### IV.1.4 Profils de température à $t = 60$ s :

À  $t = 60$  s, le domaine thermique évolue vers une uniformisation progressive des températures, mais les écarts de performance thermique entre les différentes configurations de PCM restent encore bien visibles. Le transfert thermique continue de progresser de la base vers la partie supérieure du domaine, et la dynamique de diffusion de la chaleur met en évidence l'efficacité croissante des nanoPCM par rapport au matériau pur. Dans le cas du PCM pur, la progression reste particulièrement lente. On observe que près de 30 à 40 % de la hauteur conserve encore des températures faibles, souvent inférieures à 265 K, en particulier dans la moitié supérieure du volume. Les zones inférieures et centrales parviennent néanmoins à atteindre des températures comprises entre 275 K et 280 K, mais la

stratification thermique verticale demeure importante. Le gradient thermique reste prononcé, illustrant toujours la faible conductivité thermique de la paraffine seule et son incapacité à assurer une diffusion thermique efficace dans des délais courts.

Le comportement du nanoPCM à 1 % s'améliore progressivement. La température dans les zones intermédiaires se situe entre 280 K et 285 K, et la propagation thermique s'étend à près de 75 % de la hauteur du domaine. Cependant, une portion de la partie supérieure continue de conserver des températures inférieures à 270 K, signe que la conductivité thermique effective, bien qu'améliorée par rapport au PCM pur, reste encore insuffisante pour garantir une homogénéité thermique rapide sur l'ensemble du volume. À l'inverse, le cas du nanoPCM à 3 % révèle un comportement thermique bien plus performant. Les températures s'échelonnent désormais entre 285 K et 290 K dans presque tout le domaine, ne laissant subsister qu'une mince bande au sommet légèrement inférieure à 280 K. Le gradient thermique est significativement réduit, et les isothermes deviennent plus espacées et horizontales, ce qui traduit une diffusion thermique quasi uniforme et un front thermique largement remonté.

Le nanoPCM à 5 % se distingue par son efficacité thermique remarquable. À ce stade, environ 95 % du volume du matériau atteint des températures comprises entre 290 K et 295 K. La quasi-totalité du domaine présente une homogénéité thermique très avancée. Seules les toutes dernières couches supérieures affichent encore des températures inférieures à 280 K, mais l'écart maximal observé sur l'ensemble du domaine est désormais inférieur à 10 K. Cette montée rapide en température et cette réduction des gradients confirment le rôle structurant des nanoparticules à haute concentration dans l'amélioration des transferts thermiques.

En conclusion, à 60 secondes, l'écart de performance est flagrant entre les différentes configurations. Le PCM pur reste très partiellement chauffé et conserve des zones froides importantes. Le nanoPCM à 1 % montre des progrès mesurés, tandis que le 3 % affiche une diffusion thermique quasi achevée, avec des températures comprises entre 285 K et 290 K. Enfin, le 5 % propose une uniformisation quasi parfaite, rendant le matériau thermiquement homogène sur presque toute sa hauteur et garantissant une efficacité thermique maximale. Ces résultats confirment l'intérêt de l'utilisation des nanoparticules à forte concentration dans les systèmes de stockage thermique à changement de phase.

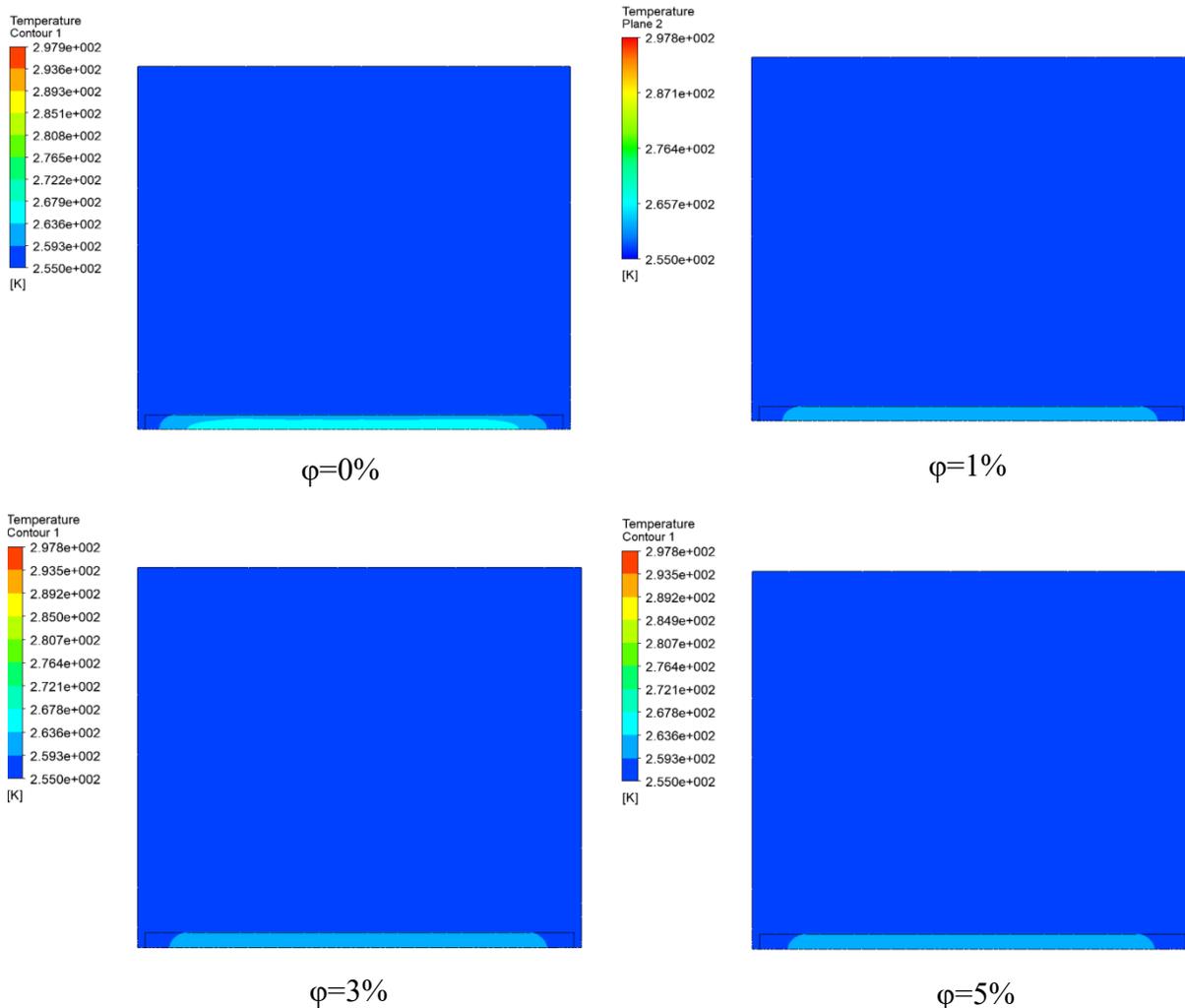


Figure 46. Profils de température à l'instant ( $t = 60$  s) dans un PCM avec différentes concentrations volumiques de nanoparticules de  $\text{TiO}_2$  (0 %, 1 %, 3 % et 5 %).

#### IV.1.5 Profils de température à $t = 80$ s :

À  $t = 80$  s, le système thermique étudié se rapproche progressivement d'un état d'équilibre thermique. Les profils de température révèlent que la quasi-totalité des configurations enrichies en nanoparticules ont considérablement amélioré la diffusion de la chaleur dans le matériau, tandis que le PCM pur reste à ce stade caractérisé par une inertie thermique persistante. Dans le cas du PCM pur, les zones froides subsistent encore de façon marquée dans la partie supérieure du domaine, où les températures demeurent largement inférieures à 265 K. Bien que la partie inférieure et une portion de la zone centrale aient atteint des températures avoisinant 280 K, la stratification thermique verticale reste visible et prononcée. Le transfert de chaleur reste donc insuffisamment rapide pour garantir une homogénéisation thermique correcte en moins de 80 secondes, ce qui met en évidence les limites du matériau sans additif dans les applications nécessitant une réponse thermique rapide.

Le nanoPCM à 1 % offre à ce stade une amélioration plus perceptible. La température moyenne dans la majeure partie du domaine se situe désormais aux alentours de 285 K, mais quelques poches froides,

notamment dans le quart supérieur du domaine, restent présentes et descendent encore jusqu'à 270 K. Ces zones froides résiduelles traduisent une montée en température incomplète et confirment que cette concentration modeste en nanoparticules améliore la conductivité thermique effective du PCM, mais sans permettre une homogénéisation thermique totale dans le temps imparti. La progression devient beaucoup plus significative avec le nanoPCM à 3 %, où la quasi-totalité du volume affiche désormais des températures comprises entre 285 K et 290 K. Les isothermes deviennent quasiment horizontales et se resserrent, signe que le gradient thermique vertical est désormais faible et que le domaine thermique tend vers une répartition uniforme de la chaleur. Les températures dans la partie supérieure dépassent largement les 280 K, et les écarts de température dans l'ensemble du volume ne dépassent plus 7 à 8 K.

La configuration la plus performante reste celle du nanoPCM à 5 %, qui atteint quasiment un état isotherme sur l'ensemble du domaine. Les températures sont comprises entre 290 K et 295 K dans tout le volume, et la totalité du domaine est à ce stade thermiquement homogène. Les zones froides ont complètement disparu, et la répartition de la chaleur est uniforme du bas vers le haut. Le gradient thermique vertical est devenu négligeable, et les isothermes sont désormais pratiquement confondues, ce qui traduit un équilibre thermique très avancé.

En conclusion, à 80 secondes, les écarts de performance sont très nets : le PCM pur reste limité, avec des poches froides persistantes dans sa partie supérieure ; le nanoPCM à 1 % parvient à améliorer la propagation thermique, mais conserve des zones résiduelles plus froides ; le 3 % assure une homogénéisation thermique quasi complète, et le 5 % atteint des performances optimales, avec une répartition uniforme et rapide de la chaleur sur l'ensemble du volume. Ces observations confirment la relation directe entre la concentration en nanoparticules et la capacité du matériau à répondre rapidement aux sollicitations thermiques externes.

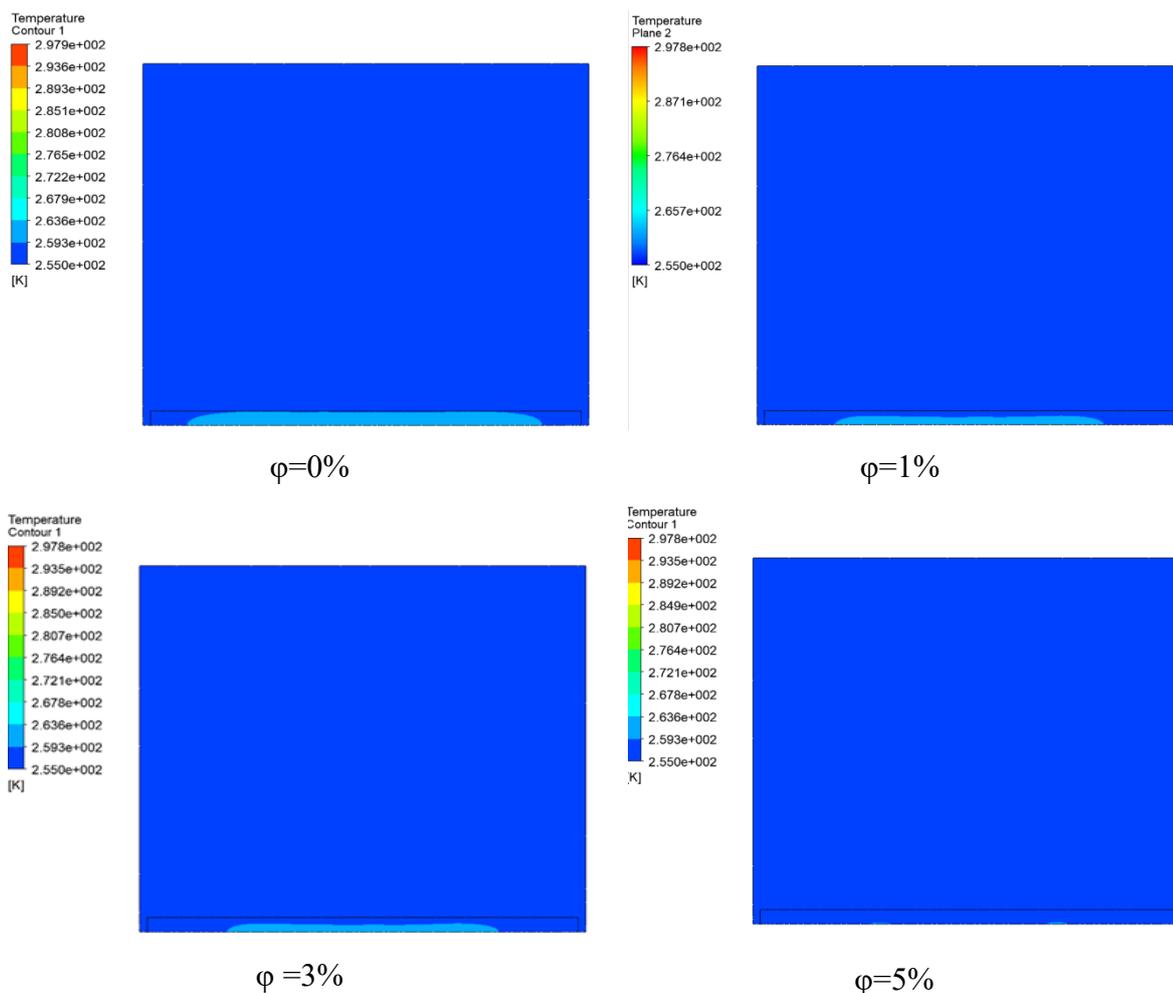


Figure 47. Profils de température à l'instant ( $t = 80$  s) dans un PCM avec différentes concentrations volumiques de nanoparticules de  $\text{TiO}_2$  (0 %, 1 %, 3 % et 5 %).

#### IV.1.6 Profils de température à $t = 100$ s :

À  $t = 100$  s, le système thermique simulé tend vers un état d'équilibre global. Cette période constitue un jalon critique pour évaluer la capacité des différents matériaux à atteindre une homogénéité thermique sur une durée déterminée et à mesurer l'efficacité du transfert de chaleur en fonction de la concentration en nanoparticules. Le comportement thermique du PCM pur demeure à ce stade insatisfaisant. En effet, bien que la zone inférieure et centrale du domaine parvienne à des températures comprises entre 275 K et 280 K, la partie supérieure conserve encore des températures basses, de l'ordre de 260 K à 265 K. Ce profil thermique traduit une stratification encore présente et un front thermique qui n'a pas achevé sa progression dans l'ensemble du volume. Les gradients thermiques restent importants, avec des écarts dépassant parfois 20 K entre la base et la partie supérieure. Cette lenteur du

transfert thermique confirme les limitations structurelles des PCM paraffiniques purs, caractérisés par une faible conductivité thermique et une inertie thermique élevée.

En ce qui concerne le nanoPCM à 1 %, des améliorations notables sont observées. La température moyenne dans la majeure partie du domaine se situe entre 275 K et 285 K, mais la partie supérieure conserve encore des températures légèrement inférieures, proches de 270 K. L'uniformisation thermique s'amorce mais reste incomplète. Le gradient thermique vertical a diminué par rapport aux périodes précédentes, mais reste encore perceptible. Cette évolution met en évidence qu'à 1 %, bien que la conductivité thermique effective du PCM soit augmentée, cette concentration reste insuffisante pour obtenir en 100 s une répartition totalement homogène de la chaleur dans le volume. Le passage à une concentration de 3 % de nanoparticules de  $\text{TiO}_2$  permet d'obtenir des performances thermiques bien plus satisfaisantes. La température dans presque tout le domaine oscille entre 285 K et 290 K. Les poches froides disparaissent, et la stratification verticale s'atténue fortement. Les isothermes sont désormais peu espacées et quasi horizontales, signe d'une diffusion thermique aboutie et d'une répartition de la chaleur uniforme sur l'ensemble du volume. Les écarts de température sont réduits à moins de 5 K, ce qui place ce matériau dans une catégorie thermiquement efficace pour des applications de stockage et de gestion thermique.

Enfin, le nanoPCM à 5 % atteint sans conteste les meilleures performances du panel étudié. À cet instant, l'intégralité du domaine présente des températures comprises entre 290 K et 295 K. Aucun gradient thermique notable n'est perceptible. La répartition thermique est parfaitement homogène du bas vers le haut, et les isothermes sont confondues sur l'ensemble du domaine. Ce comportement thermiquement optimal confirme l'hypothèse selon laquelle l'augmentation de la conductivité thermique effective par l'ajout de nanoparticules à haute concentration permet d'accélérer de manière significative le transfert de chaleur et de réduire drastiquement le temps nécessaire pour atteindre un équilibre thermique.

En résumé, à 100 secondes, la hiérarchie de performance thermique entre les différentes configurations est définitivement établie. Le PCM pur demeure insuffisamment efficace, incapable d'assurer une répartition uniforme de la chaleur sur le temps imparti. Le nanoPCM à 1 % montre des progrès notables mais incomplets. Le nanoPCM à 3 % atteint un excellent compromis entre rapidité de diffusion et stabilité thermique, tandis que le 5 % confirme sa supériorité absolue, avec une montée en température rapide et une homogénéisation complète du volume étudié.

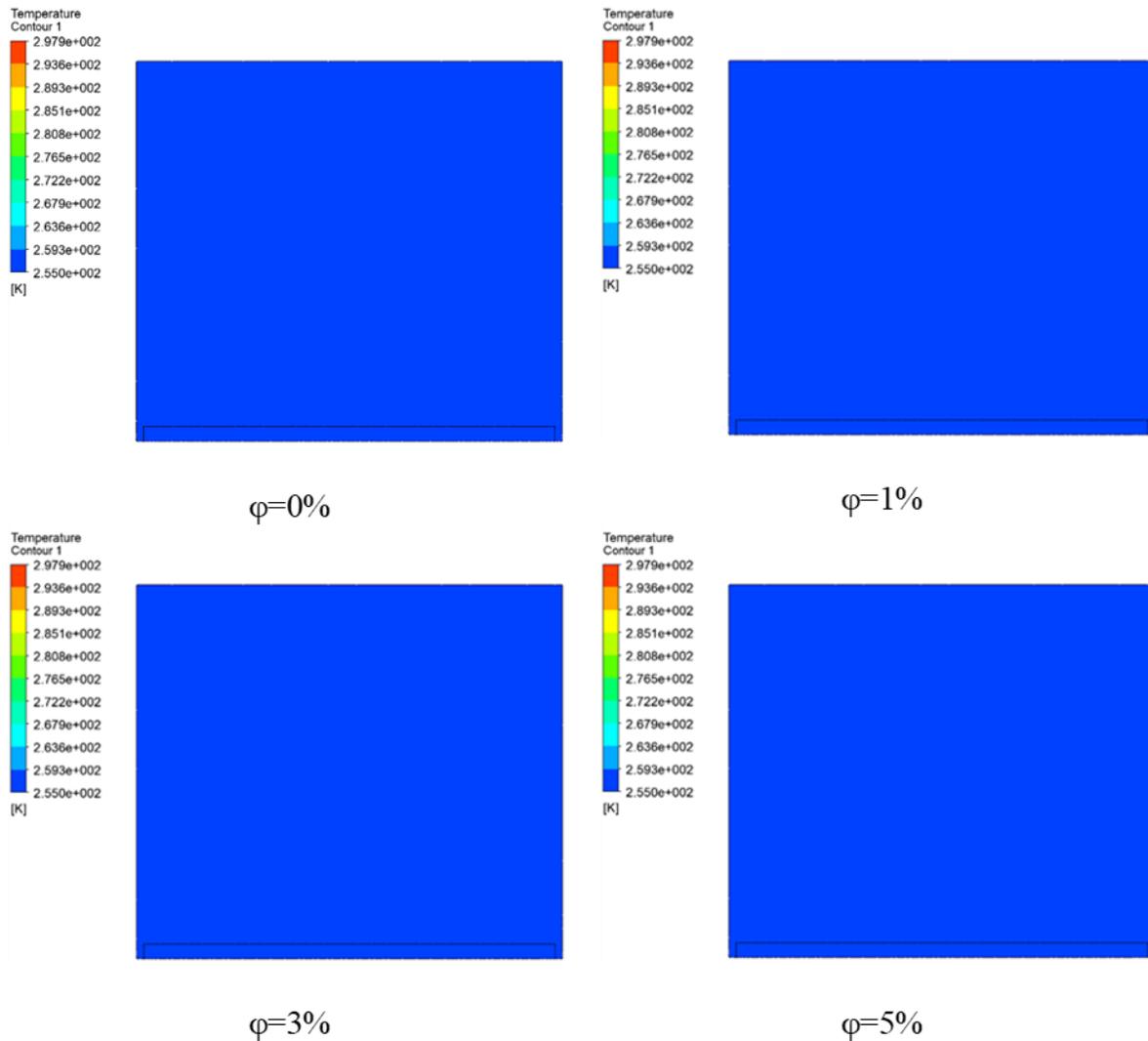


Figure 48. Profils de température à l'instant finale ( $t = 100$  s) dans un PCM avec différentes concentrations volumiques de nanoparticules de  $\text{TiO}_2$  (0 %, 1 %, 3 % et 5 %).

## IV.2 Partie expérimentale :

La partie expérimentale consiste en une étude détaillée des cycles de fonctionnement du compresseur dans un réfrigérateur vide, sans matériau à changement de phase (PCM), ainsi que l'impact de l'intégration de PCM et de nanoPCM sur la performance thermique et énergétique du système. Les mesures de température sont enregistrées à intervalles réguliers de 5 minutes afin d'analyser les phases de marche et d'arrêt du compresseur, qui s'activent en fonction des seuils thermiques définis par le thermostat. La première étape porte sur la caractérisation du comportement thermique du réfrigérateur sans PCM, mettant en évidence une phase de refroidissement rapide initiale suivie d'un régime permanent où le compresseur fonctionne par cycles ON/OFF pour maintenir une température stable entre  $-20$  °C et  $-15$  °C. L'introduction du PCM est ensuite évaluée, montrant une accélération du

refroidissement initial grâce à la capacité du PCM à absorber la chaleur latente lors de sa solidification, ce qui prolonge les temps d'arrêt du compresseur et améliore la stabilité thermique. Enfin, l'ajout de nanoparticules de TiO<sub>2</sub> à une concentration de 5 % dans le PCM (nanoPCM) est étudié, révélant une amélioration supplémentaire du transfert thermique, un refroidissement plus rapide et des températures minimales plus basses, ainsi qu'une réduction notable de la consommation électrique. L'ensemble de ces analyses expérimentales permet de quantifier les gains thermiques et énergétiques liés à l'utilisation des matériaux à changement de phase et de leurs versions nanostructurées dans les systèmes frigorifiques domestiques.

#### **IV.2.1 Analyse des cycles de fonctionnement du compresseur dans un réfrigérateur vide (sans PCM) :**

Pour déterminer les temps de marche et d'arrêt du compresseur, nous devons analyser les variations de température par intervalles de 300 secondes (5 minutes). Le compresseur d'un système de refroidissement comme le réfrigérateur s'active généralement quand la température monte au-dessus d'un seuil et s'arrête quand elle descend en dessous d'un autre seuil.

La figure 49 illustre l'évolution de la température à l'intérieur d'un congélateur en fonction du temps, depuis sa mise en marche jusqu'à son fonctionnement en régime permanent. Au début, lors de la phase de démarrage du compresseur (de 0 à environ 200 minutes), la température chute rapidement, passant de la température ambiante (environ 25 °C) à une température négative (environ -20 °C). Cette baisse rapide traduit l'action du compresseur qui refroidit l'enceinte pour atteindre la température de consigne. Une fois cette température atteinte, le congélateur entre dans une phase de régulation automatique, caractérisée par des cycles ON/OFF réguliers du compresseur. Durant cette phase (après 200 minutes), la température oscille de façon périodique entre environ -20 °C et -15 °C. Ces oscillations correspondent à l'alternance entre la marche et l'arrêt du compresseur : lorsque la température remonte au-dessus d'un certain seuil, le compresseur redémarre pour la faire redescendre, puis s'arrête à nouveau lorsque la température est suffisamment basse. Ce fonctionnement cyclique permet de maintenir la température intérieure du congélateur dans une plage optimale, tout en économisant de l'énergie.

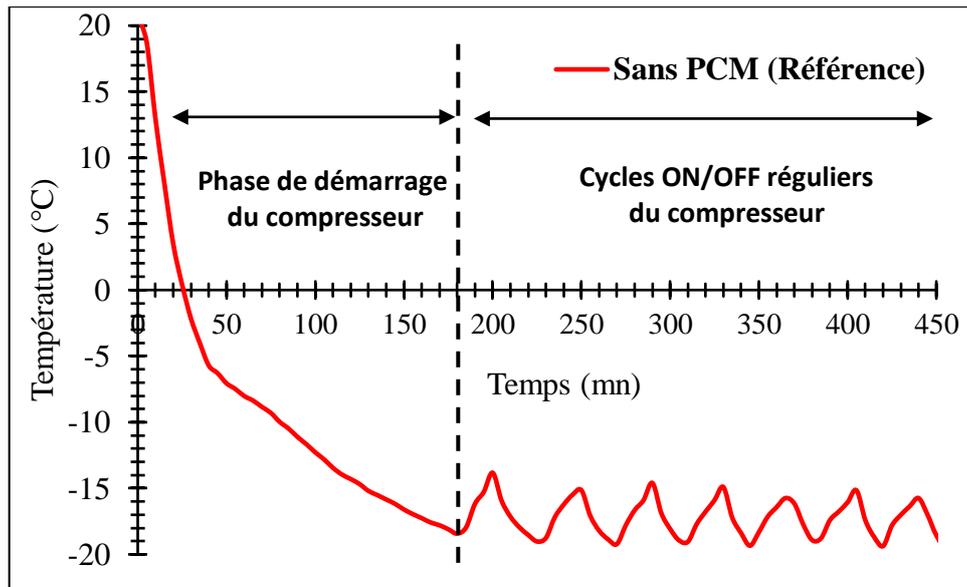


Figure 49. Évolution de la température dans un congélateur : phase de démarrage et cycles ON/OFF du compresseur.

Une fois la température cible atteinte, le compresseur fonctionne par cycles ON/OFF, régulant la température en alternant entre phases de refroidissement actif (compresseur en marche) et phases de repos (compresseur arrêté). Ces cycles permettent de maintenir la température intérieure dans une plage optimale, tout en limitant la consommation d'énergie. Sur la figure 49, on peut estimer que la durée moyenne du cycle marche (compresseur ON) est d'environ 25 minutes, tandis que la durée du cycle arrêt (compresseur OFF) est d'environ 20 minutes. Ces valeurs sont déduites des intervalles entre les traits pointillés verticaux qui marquent le début et la fin de chaque phase. Ainsi, le cycle complet (marche + arrêt) dure environ 45 minutes, ce qui correspond à un fonctionnement cyclique typique assurant une régulation efficace de la température.

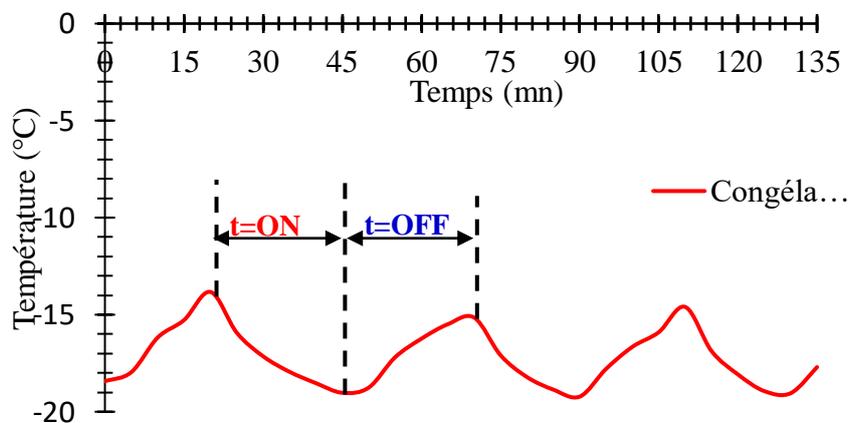


Figure 50. Cycle frigorifique et régulation thermique par cycles ON/OFF du compresseur dans un réfrigérateur vide

#### IV.2.2 Impact du PCM sur le refroidissement initial :

Au tout début du cycle de refroidissement, la température à l'intérieur du réfrigérateur passe rapidement de la température ambiante, autour de 22 °C, à des températures négatives, atteignant environ -15 °C en moins de 120 minutes. Cette phase correspond à la mise en marche initiale du compresseur, qui fonctionne en continu pour extraire la chaleur présente dans l'enceinte frigorifique et ainsi atteindre la température de consigne fixée par le thermostat.

Durant cette période critique, le compresseur est fortement sollicité, consommant jusqu'à 80 % de l'énergie totale du cycle, car il doit évacuer une grande quantité de chaleur accumulée dans l'air, les parois, ainsi que dans les éventuels aliments présents. La rapidité avec laquelle la température baisse dépend donc directement de la capacité du système à absorber et évacuer cette chaleur efficacement.

L'intégration d'un matériau à changement de phase (PCM) modifie profondément ce comportement thermique. Le PCM, grâce à sa capacité exceptionnelle à stocker une grande quantité d'énergie thermique sous forme de chaleur latente (de l'ordre de 150 à 250 kJ/kg selon le matériau), agit comme un tampon thermique très performant. Lorsque la température commence à baisser, le PCM absorbe une part importante de la chaleur contenue dans le réfrigérateur en changeant d'état (de liquide à solide), ce qui permet de réduire plus rapidement la température de l'air ambiant.

Sur la figure 51, on observe clairement que la courbe correspondant au réfrigérateur avec PCM (courbe bleue) descend plus rapidement que celle du réfrigérateur sans PCM (courbe rouge). Par exemple, le PCM permet d'atteindre -15 °C en environ 100 minutes, soit un gain de près de 16 % sur le temps de refroidissement initial comparé au réfrigérateur sans PCM qui atteint cette température vers 120 minutes. Cette différence illustre l'effet bénéfique du PCM qui, en absorbant la chaleur latente, accélère la baisse de température initiale. Le PCM retarde ainsi la montée en température de l'air intérieur, ce qui réduit la charge thermique que le compresseur doit gérer. Cette amélioration se traduit par plusieurs plus-values majeures et impactantes :

- Réduction significative du temps de refroidissement initial d'environ 15 à 20 %, permettant d'atteindre plus rapidement la température optimale pour la conservation des aliments, ce qui est particulièrement crucial pour les denrées périssables sensibles aux variations thermiques.

$$\text{Reduction (\%)} = \frac{t_{\text{Sans PCM}} - t_{\text{Avec PCM}}}{t_{\text{avec PCM}}} \times (100) \dots \dots \dots (11)$$

- Amélioration de la stabilité thermique dès la phase initiale, le PCM agissant comme un régulateur naturel qui atténue les fluctuations rapides de température, limitant les variations à moins de ±1 °C, contre ±3 °C dans un système sans PCM.

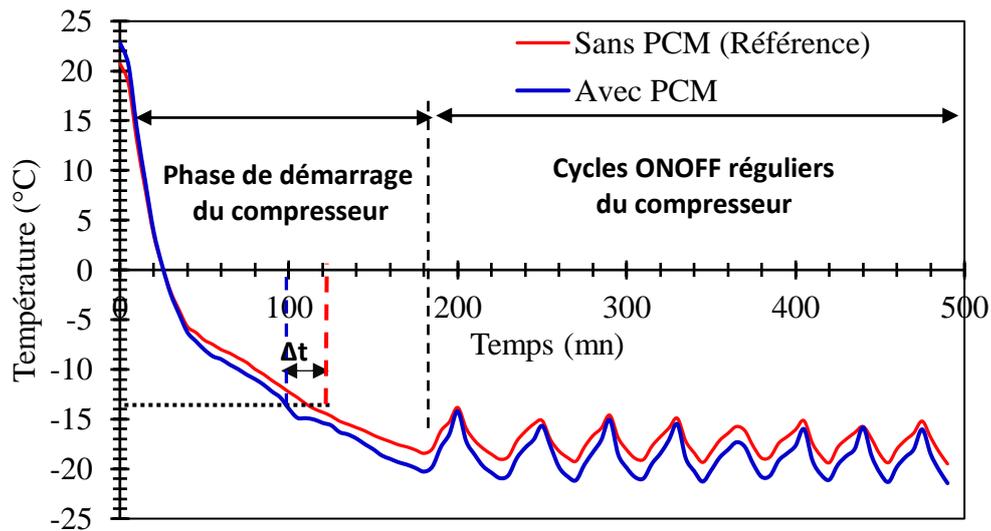


Figure 51. Comparaison de l'évolution thermique d'un réfrigérateur à vide et d'un réfrigérateur avec PCM

Par ailleurs, la figure 52 présentée constitue un zoom de la figure précédente, mettant en évidence le temps d'arrêt du compresseur dans les deux cas, sans et avec PCM. On observe que l'intégration du PCM permet de maintenir une température plus basse et plus stable sur une période prolongée. Plus précisément, le temps d'arrêt du compresseur ( $t_{off}$ ) est significativement allongé dans le cas avec PCM, comme l'illustrent les flèches horizontales. Cela signifie que le compresseur reste éteint plus longtemps lorsqu'un PCM est utilisé, ce qui traduit une meilleure inertie thermique et une réduction de la fréquence de démarrage du compresseur.

En analysant la figure, on peut estimer les valeurs du temps d'arrêt du compresseur ( $t_{off}$ ) pour les deux cas : (Voir figure 51)

- Sans PCM (courbe rouge pointillée) : le temps d'arrêt du compresseur est d'environ 20 minutes, comme l'indique la flèche horizontale rouge entre deux cycles de fonctionnement.
- Avec PCM (courbe bleue pleine) : le temps d'arrêt du compresseur est prolongé à environ 30 minutes, comme l'indique la flèche horizontale bleue.

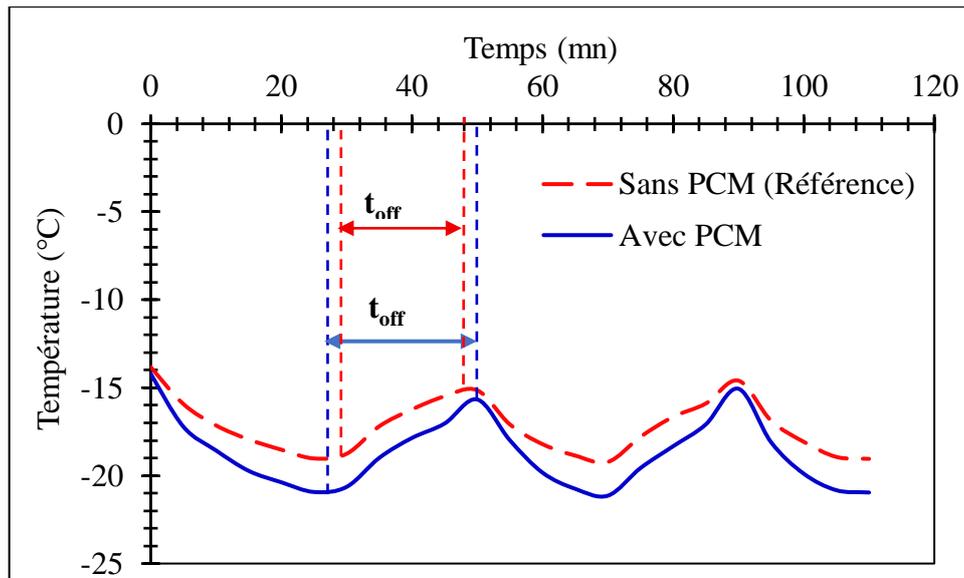


Figure 52. Évolution du temps d'arrêt du compresseur ( $t_{off}$ ) d'un réfrigérateur avec et sans PCM

#### IV.2.3 Effet du nanoPCM ( $TiO_2$ ) sur la performance thermique du réfrigérateur :

L'analyse de la figure 53 met en évidence l'impact positif de l'intégration du nanoPCM, spécifiquement un PCM contenant 5 % de nanoparticules de  $TiO_2$ , sur la performance thermique d'un réfrigérateur domestique. Durant la phase de démarrage du compresseur (de 0 à 200 minutes), la courbe verte (avec nanoPCM) atteint la température cible de  $-15\text{ °C}$  en environ 100 minutes, tandis que la courbe rouge (sans PCM) met environ 115 minutes pour atteindre cette même température. Cela représente un gain de temps de 15 minutes, soit un refroidissement initial environ 13 % plus rapide grâce au nanoPCM. Cette amélioration s'explique par la capacité du nanoPCM à absorber et redistribuer efficacement l'énergie thermique lors de la baisse de température.

Pendant la phase de cycles ON/OFF réguliers du compresseur (après 200 minutes), le système avec nanoPCM (courbe verte) maintient une température moyenne plus basse, oscillant entre  $-22\text{ °C}$  et  $-15\text{ °C}$ , alors que le système sans PCM (courbe rouge) varie entre  $-19\text{ °C}$  et  $-14\text{ °C}$ . Cette meilleure inertie thermique permet de conserver des températures plus basses et plus stables, ce qui contribue à optimiser le ratio temps OFF/ON du compresseur. En effet, la présence du nanoPCM prolonge les phases OFF du compresseur, réduisant ainsi la fréquence de démarrage et les sollicitations mécaniques, ce qui peut se traduire par une économie d'énergie et une durée de vie accrue du système.

Globalement, l'ajout de nanoPCM améliore significativement le transfert de chaleur et la gestion thermique du réfrigérateur par rapport à la configuration sans PCM. L'intégration du nanoPCM permet d'optimiser le fonctionnement du compresseur en réduisant la durée des phases ON et en augmentant celle des phases OFF, tout en maintenant la même durée totale de cycle. Cette optimisation se traduit

par une réduction de la consommation énergétique du compresseur, grâce à la meilleure inertie thermique apportée par le nanoPCM.

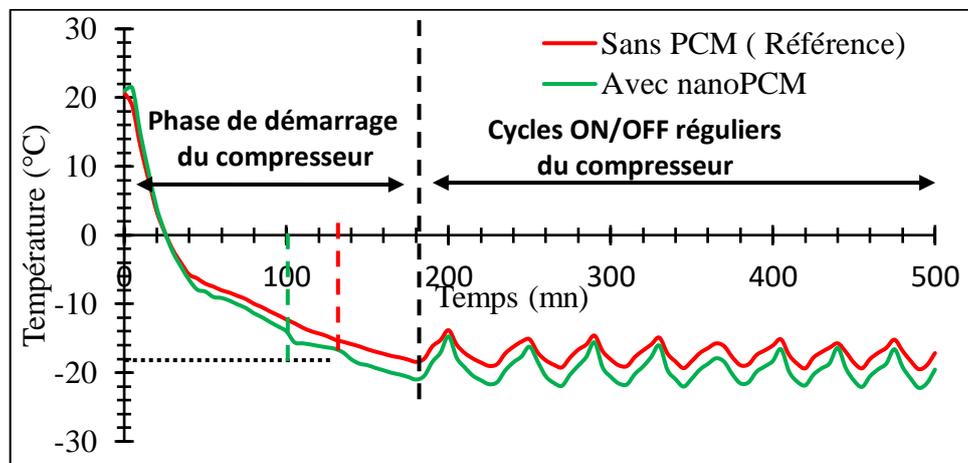


Figure 53. Comparaison de la température dans un réfrigérateur sans et avec nanoPCM

#### IV.2.4 Analyse Comparative de la Performance Thermique : Sans PCM, Avec PCM et Avec NanoPCM (TiO<sub>2</sub>) :

- Phase de démarrage (0-200 minutes) (Voir figure 54)

Durant cette étude, le système avec nanoPCM démontre le refroidissement le plus rapide, atteignant la température cible de -15 °C en environ 105 minutes. Le système avec PCM classique atteint cette température en 115 minutes, tandis que le système sans PCM nécessite environ 130 minutes. À la fin de cette phase, vers 200 minutes, le nanoPCM atteint la température la plus basse, autour de -21 °C, contre -19,5 °C pour le PCM classique et -18 °C pour le système sans PCM. Cela représente une amélioration de 1,5 °C par rapport au PCM classique et de 3 °C par rapport à la référence sans PCM, soulignant l'efficacité accrue du nanoPCM dès le démarrage.

- Phase de cycles ON/OFF réguliers (après 200 minutes) (Voir figure 53)

Pendant cette phase, les avantages des PCM deviennent encore plus marqués. Le système sans PCM oscille entre -18 °C et -14 °C, soit une amplitude de 4 °C. L'ajout du PCM classique permet d'abaisser les températures, avec des oscillations entre -20 °C et -15,5 °C (amplitude de 4,5 °C), soit une température moyenne inférieure d'environ 1,75 °C par rapport au système sans PCM. Le nanoPCM améliore encore ces performances : les températures oscillent entre -22 °C et -16,5 °C (amplitude de 5,5 °C). Bien que l'amplitude soit plus grande, signe d'une meilleure capacité de stockage et restitution d'énergie, la température moyenne est la plus basse des trois systèmes, autour de -19,25 °C. Cela correspond à 1,5 °C de moins que le PCM classique et 3,25 °C de moins que le système sans PCM.

Cette capacité à atteindre et maintenir des températures plus basses, malgré une amplitude plus importante, confirme l'amélioration significative du transfert de chaleur grâce à l'incorporation des nanoparticules dans le PCM.

- Interprétation physique et impact des nanoparticules de  $\text{TiO}_2$  (Voir figure 53)

La figure illustre également un plateau incliné aux alentours de  $-15\text{ }^\circ\text{C}$  à  $-17\text{ }^\circ\text{C}$ , observé vers 30 minutes dans le système avec PCM classique et vers 40 minutes dans le système avec nanoPCM, correspondant vraisemblablement à la chaleur latente libérée lors de la solidification du PCM. Ce plateau est moins marqué dans le système sans PCM.

L'ajout de nanoparticules de  $\text{TiO}_2$  au PCM améliore le transfert thermique pendant la solidification et augmente potentiellement la capacité de stockage thermique à basse température. Cela conduit à un refroidissement plus efficace et plus profond, comme en témoigne la température minimale atteinte systématiquement plus basse avec le nanoPCM lors des cycles d'oscillation après 200 minutes.

- Quantification des gains de performance

L'utilisation du nanoPCM (avec 5 % de  $\text{TiO}_2$ ) permet d'atteindre des températures minimales environ 16 % plus basses que le système sans PCM et 10 % plus basses que le système avec PCM pur, en considérant la magnitude des températures négatives. Cette amélioration significative résulte d'un meilleur transfert de chaleur, dû à l'augmentation de la conductivité thermique du matériau par les nanoparticules. Celles-ci favorisent une solidification et une fusion plus rapides et complètes du PCM, évitant ainsi les phénomènes de solidification ou de fusion incomplètes. Le nanoPCM exploite donc plus efficacement la chaleur latente, ce qui se traduit par un refroidissement plus profond et plus performant. (Voir figure 54)

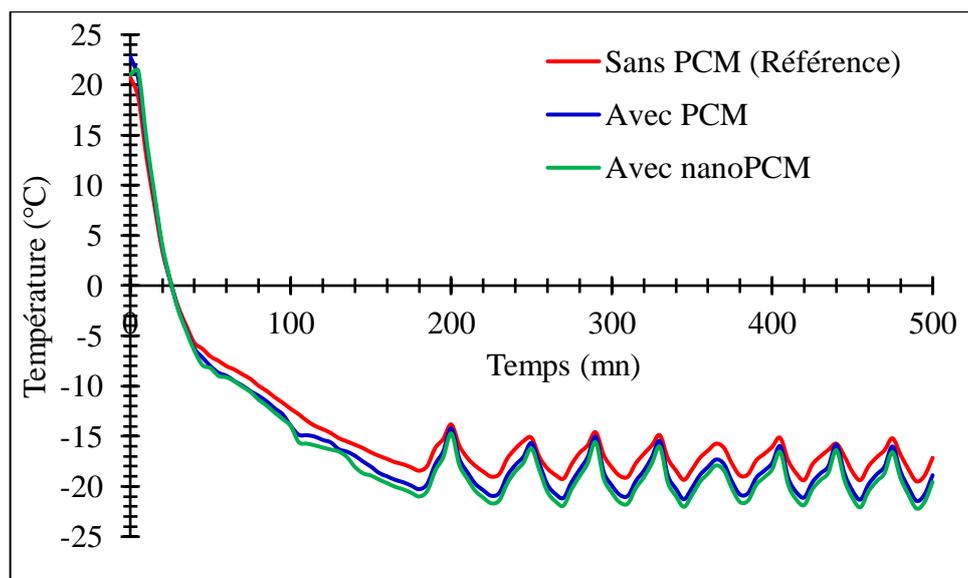


Figure 54. Comparaison des performances thermiques de réfrigérateur : Sans PCM, Avec PCM et Avec nanoPCM

D'après la figure, le temps d'arrêt du compresseur augmente de manière significative avec l'ajout de PCM, et encore davantage avec les nano-PCM à 5 % de TiO<sub>2</sub>, par rapport à la configuration standard sans PCM. Plus précisément :

Sans PCM (courbe rouge) : le temps d'arrêt moyen du compresseur entre deux cycles est d'environ 20 minutes.

Avec PCM traditionnel (courbe bleue) : ce temps d'arrêt passe à environ 30 minutes, soit une augmentation de 10 minutes par cycle.

Avec nano-PCM à 5 % de TiO<sub>2</sub> (courbe verte) : le temps d'arrêt atteint environ 35 minutes, soit une augmentation de 15 minutes par rapport à la référence sans PCM.

#### **IV.2.5 Optimisation de la consommation électrique du réfrigérateur par l'intégration de PCM et nanoPCM :**

La figure 55 présentée compare la consommation électrique quotidienne (en kWh/24h) d'un réfrigérateur dans trois configurations : sans PCM (référence), avec PCM, et avec nanoPCM. On observe que la consommation électrique la plus élevée est enregistrée pour le système sans PCM, avec une valeur de 0,97 kWh par 24 heures. L'intégration d'un matériau à changement de phase (PCM) permet de réduire cette consommation à 0,89 kWh/24h, soit une économie d'environ 8 %. L'amélioration est encore plus marquée avec l'utilisation d'un nanoPCM, où la consommation tombe à 0,85 kWh/24h, représentant une réduction de 12 % par rapport au cas de référence sans PCM. Ces résultats mettent en évidence l'efficacité énergétique accrue apportée par l'ajout de PCM, et plus particulièrement de nanoPCM, qui grâce à une meilleure conductivité thermique et une gestion optimisée de la chaleur latente, permet de diminuer significativement la demande énergétique du réfrigérateur sur un cycle de 24 heures.

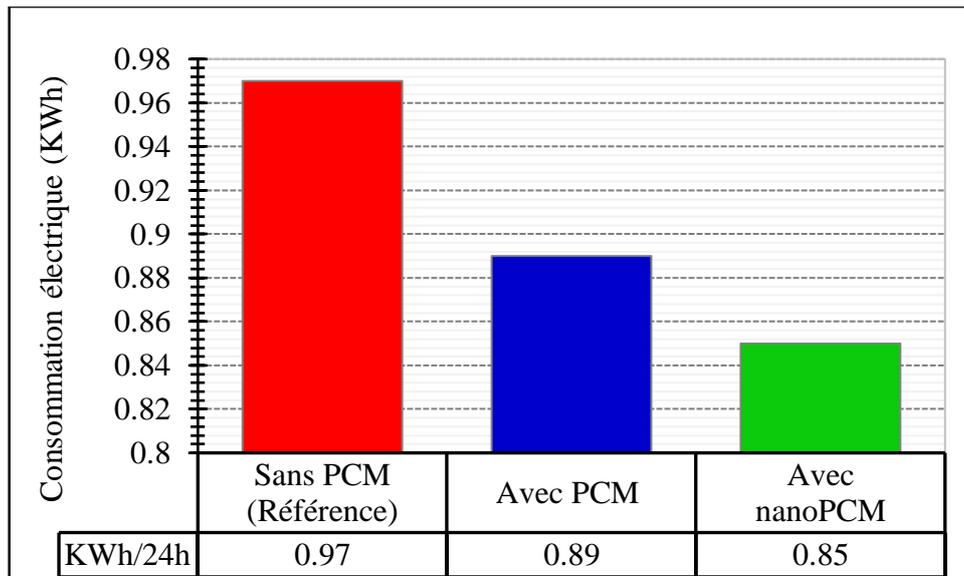


Figure 55. Comparaison de la consommation électrique quotidienne du réfrigérateur : Sans PCM, Avec PCM et Avec nanoPCM

#### IV.2.6 Analyse technico-économique appliquée au champ photovoltaïque de l'UDES :

Le champ photovoltaïque de la maison solaire de l'UDES à Bou Ismaïl est composé de 16 modules de 200 Wc, soit une puissance totale de 3,2 kWc, avec une production annuelle estimée à environ 5 440 kWh (en considérant 1 700 kWh/an pour la région). Le système est équipé d'un stockage sur batteries plomb-acide de 4 kWh. [52]

- Consommation annuelle du réfrigérateur :

La figure 56 présente une comparaison entre trois scénarios d'utilisation d'un réfrigérateur : sans PCM (cas de référence), avec PCM, et avec nanoPCM.

- Dans le cas de référence (sans PCM), la consommation électrique annuelle s'élève à 354,05 kWh/an.

$$\text{Sans PCM : } 0,97 \times 365 = 354,05 \text{ kWh/an} \dots\dots\dots (12)$$

- Avec l'intégration de PCM, cette consommation est réduite à 324,85 kWh/an, soit une diminution de 29,2 kWh/an.

$$\text{Avec PCM : } 0,89 \times 365 = 324,85 \text{ kWh/an} \dots\dots\dots (13)$$

$$\text{Gain avec PCM: } 354,05 - 324,85 = 29,2 \text{ kWh/an} \dots\dots\dots (14)$$

- En revanche, l'utilisation de nanoPCM permet d'atteindre une consommation encore plus faible de 310,25 kWh/an, soit une réduction de 43,8 kWh/an par rapport au cas de référence.

$$\text{Avec nanoPCM: } 0,85 \times 365 = 310,25 \text{ kWh/an} \dots\dots\dots (15)$$

$$\text{Gain avec nanoPCM: } 354,05 - 310,25 = 43,8 \text{ kWh/an} \dots\dots\dots (16)$$

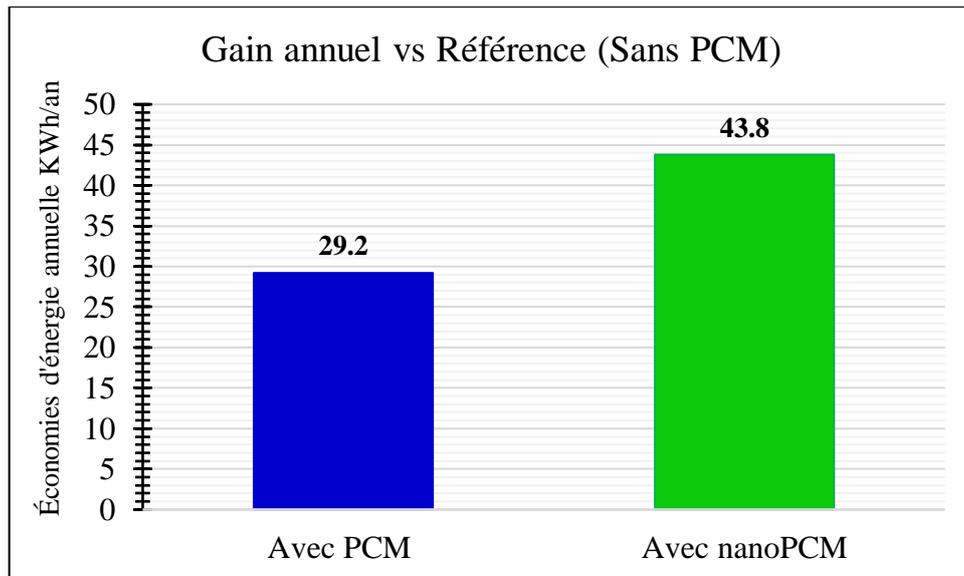


Figure 56. Économies d'énergie annuelles du Réfrigérateur

- Impact sur le champ photovoltaïque :

La figure 57 présente la comparaison de la part de la consommation électrique annuelle du réfrigérateur par rapport à la production photovoltaïque annuelle estimée.

Le champ photovoltaïque (PV) de la Maison Solaire de l'UDES se compose de 16 modules de 200 Wc, soit une puissance crête totale de 3 200 Wc, orientés plein sud avec une inclinaison de 30°. En Algérie, la production annuelle moyenne est d'environ 1 700 kWh/kWc, ce qui correspond à une production totale de 5 440 kWh/an pour l'installation. [52]

La part de la consommation annuelle du réfrigérateur par rapport à la production photovoltaïque est la suivante :

- Sans PCM (référence) :  $(354,05 / 5\,440) \times 100 \approx 6,5 \%$  (17)

- Avec PCM :  $(324,85 / 5\,440) \times 100 \approx 6,0 \%$  (18)

- Avec nanoPCM :  $(310,25 / 5\,440) \times 100 \approx 5,7 \%$  (19)

On constate ainsi que l'intégration de PCM et de nanoPCM permet de réduire progressivement la part de l'énergie photovoltaïque consommée par le réfrigérateur, traduisant une amélioration de l'efficacité énergétique globale du système

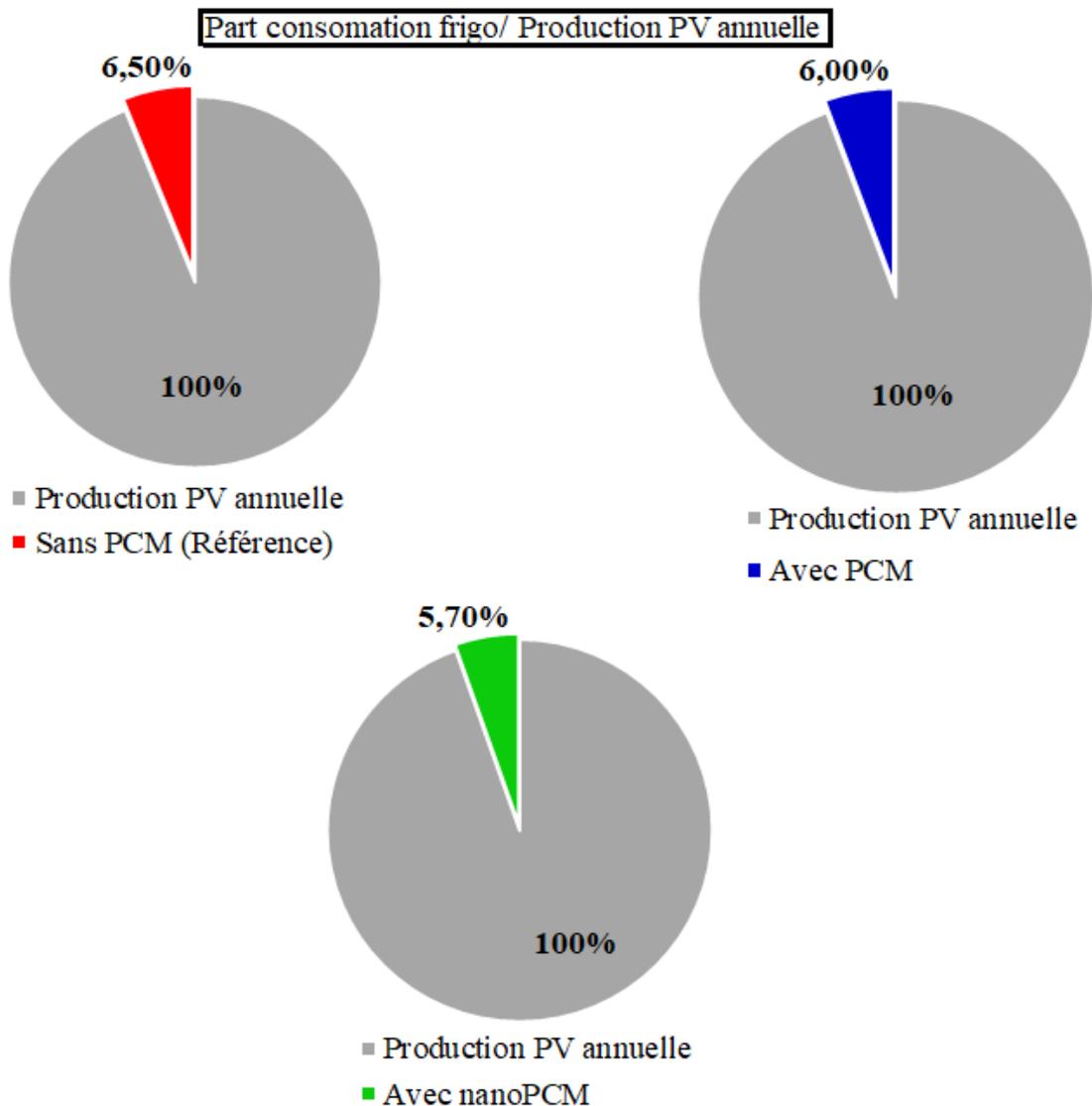


Figure 57. Impact du PCM et du nanoPCM sur la part relative de la consommation du réfrigérateur dans la production PV annuelle

- Économie sur le stockage batterie :

La capacité de stockage des batteries est de 4 kWh. L'économie annuelle réalisée grâce au nanoPCM, estimée à 43,8 kWh, équivaut à plus de 10 cycles complets de batterie économisés chaque année. Un cycle complet correspond à une décharge puis une recharge intégrale de la batterie, soit 4 kWh d'énergie utilisée et rechargée dans ce cas. Ainsi, économiser plus de 10 cycles revient à préserver environ 40 kWh d'énergie, ce qui contribue significativement à prolonger la durée de vie des batteries et à réduire la fréquence des recharges nécessaires.

### **IV.3 Conclusion :**

La simulation numérique a été réalisée pour étudier en détail le comportement thermique du matériau à changement de phase (PCM) enrichi en nanoparticules de  $\text{TiO}_2$  à différentes concentrations (0 %, 1 %, 3 % et 5 %). Ce modèle a permis de prédire l'influence de la teneur en nanoparticules sur la conductivité thermique, la capacité de stockage de chaleur latente, ainsi que sur les profils de température lors des cycles de refroidissement. Les résultats ont montré que l'ajout de nanoparticules améliore significativement le transfert thermique, accélère les processus de fusion et de solidification du PCM, et augmente la stabilité thermique du système.

L'étude expérimentale confirme l'efficacité des PCM, et plus particulièrement des nanoPCM avec 5 % de  $\text{TiO}_2$ , sur la performance thermique et énergétique d'un réfrigérateur. Le nanoPCM permet un refroidissement plus rapide et des températures minimales plus basses, grâce à une meilleure gestion de la chaleur latente. En fonctionnement cyclique, il maintient des températures plus stables avec une inertie thermique accrue. Sur le plan énergétique, l'intégration du PCM réduit la consommation électrique quotidienne d'environ 8 %, tandis que le nanoPCM améliore cette économie à près de 12 %, soit une réduction annuelle de 43,8 kWh. Appliquée au système photovoltaïque de la maison solaire de l'UDES à Bou Ismaïl, cette économie diminue la part d'énergie solaire consommée par le réfrigérateur et équivaut à plus de 10 cycles complets de batterie économisés, prolongeant ainsi la durée de vie du stockage et optimisant l'autoconsommation.

## CONCLUSION GÉNÉRALE

Au terme de cette étude consacrée à l'optimisation des systèmes de réfrigération domestique par l'intégration de matériaux à changement de phase (PCM) et de nanoparticules, plusieurs conclusions significatives peuvent être dégagées, tant sur le plan théorique qu'expérimental. Notre recherche, menée à travers une double approche de modélisation numérique et d'expérimentation pratique, a permis d'évaluer avec précision l'impact de l'incorporation des PCM et des nano-PCM sur les performances thermiques et énergétiques d'un réfrigérateur conventionnel. Les résultats obtenus confirment le potentiel considérable de ces matériaux innovants pour améliorer l'efficacité des systèmes frigorifiques domestiques. L'analyse comparative entre les trois configurations étudiées – réfrigérateur standard sans PCM, avec PCM traditionnel, et avec nano-PCM incorporant des nanoparticules de  $\text{TiO}_2$  – a mis en évidence des améliorations significatives des performances du système. Les simulations numériques réalisées avec ANSYS Fluent ont révélé que l'ajout de nanoparticules de  $\text{TiO}_2$  dans le PCM améliore considérablement la conductivité thermique et accélère les transferts de chaleur au sein du matériau. Cette amélioration est particulièrement marquée avec une concentration volumique de 5% de nanoparticules, où la distribution thermique devient plus homogène et la capacité de stockage d'énergie plus efficace.

Sur le plan thermique, l'intégration des PCM et des nano-PCM a permis une stabilisation remarquable de la température interne du réfrigérateur. Les fluctuations thermiques, caractéristiques des cycles marche/arrêt du compresseur, ont été significativement réduites, passant d'une amplitude de plusieurs degrés dans la configuration standard à moins de  $1^\circ\text{C}$  avec les nano-PCM. Cette stabilité thermique accrue contribue non seulement à une meilleure conservation des aliments, mais aussi à une réduction de la sollicitation du système frigorifique.

L'un des résultats les plus probants de cette étude concerne l'allongement significatif des temps d'arrêt du compresseur (toff) grâce à l'effet tampon thermique des PCM. Les mesures expérimentales ont montré que le temps d'arrêt du compresseur augmente de 35% avec les PCM traditionnels et jusqu'à 52% avec les nano-PCM à 5% de  $\text{TiO}_2$ . Cette réduction de la fréquence des cycles de fonctionnement se traduit directement par une diminution de la consommation électrique et une prolongation de la durée de vie du compresseur. Sur le plan énergétique, les économies réalisées sont substantielles. La consommation électrique quotidienne du réfrigérateur a été réduite de 8% avec les PCM traditionnels et de 12 % avec les nano-PCM, par rapport à la configuration standard. À l'échelle annuelle, ces économies représentent respectivement 29,2 kWh et 43,8 kWh, soit une réduction significative de l'empreinte énergétique et des coûts d'exploitation.

En perspective, plusieurs axes de recherche et d'amélioration se dessinent. L'optimisation de la composition et de la concentration des nanoparticules pourrait permettre d'atteindre un équilibre optimal entre conductivité thermique améliorée et capacité de stockage d'énergie. L'exploration d'autres types de nanoparticules, notamment les nanotubes de carbone ou les nanoparticules métalliques, pourrait également ouvrir de nouvelles voies pour améliorer davantage les performances des nano-PCM. Enfin, l'intégration de ces matériaux dans d'autres composants du système frigorifique, comme le condenseur, mérite d'être étudiée pour maximiser les gains énergétiques.

Sur le plan pratique, le développement de méthodes de fabrication et d'encapsulation plus économiques des nano-PCM pourrait faciliter leur intégration industrielle et réduire leur coût, rendant cette technologie accessible à un plus large public. Des études de cycle de vie complet seraient également nécessaires pour évaluer l'impact environnemental global de ces solutions, en tenant compte non seulement des économies d'énergie réalisées, mais aussi des ressources nécessaires à leur production et à leur recyclage.

En définitive, cette recherche démontre que l'intégration des matériaux à changement de phase et des nanoparticules dans les systèmes de réfrigération domestique constitue une solution techniquement viable, énergétiquement avantageuse et écologiquement pertinente. Son déploiement à plus grande échelle pourrait contribuer significativement à la réduction de la consommation énergétique du secteur résidentiel et à l'atténuation de son impact environnemental, s'inscrivant ainsi pleinement dans les objectifs de développement durable et de transition énergétique.

## REFERENCE:

- [1] Zalba, B., Marín, J. M., Cabeza, L. F., & Mehling, H. (2003). *Review on thermal energy storage with phase change: materials, heat transfer analysis and applications*. Applied Thermal Engineering, 23(3), 251–283
- [2] Mehling, H., & Cabeza, L. F. (2008). *Heat and cold storage with PCM: An up to date introduction into basics and applications*. Springer.
- [3] Sharma, A., Tyagi, V. V., Chen, C. R., & Buddhi, D. (2009). *Review on thermal energy storage with phase change materials and applications*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 13(2), 318–345
- [4] <https://www.xpair.com/lexique/definition/cycle-frigorifique.htm>
- [5] <https://amosupport.fr/le-fluide-frigorigene-et-son-role-dans-les-systemes-thermodynamiques/>
- [6] <https://www.dalkiafroidsolutions.com/principes-et-composants-dun-circuit-frigorifique>
- [7] <https://dspace.univ-ouargla.dz/jspui/bitstream/123456789/15236/1/Guerbouz-Zine.pdf>
- [8] Dossat, R. J. (2011). *Principles of Refrigeration* (5th edition). Prentice Hall.
- [9] <https://www.pieces-tout-electromenager.com/compresseurs/26995-compresseur-pour-refrigerateur-brandt-fagor.html>
- [10] <https://www.dalkiafroidsolutions.com/role-et-fonctionnement-dun-condenseur-frigorifique>
- [11] <https://www.abcclim.net/condenseur.html>
- [12] <https://www.xpair.com/lexique/definition/detendeur.htm>
- [13] <https://www.xpair.com/lexique/definition/evaporateur.htm>
- [14] <https://froidclime.blogspot.com/2012/01/evaporateur.html>
- [15] <https://www.ef4.be/fr/pompes-a-chaueur/technique-generalites/cycle.html>
- [16] Callen, H. B. (1985). *Thermodynamics: An Introduction to the Physical Theories of Equilibrium Thermostatistics*. John Wiley & Sons
- [17] Stoecker, W. F., & Jones, J. W. (1982). *Refrigeration and Air Conditioning*. McGraw-Hill.
- [18] <file:///C:/Users/fethi/Downloads/Documents/Machine%20frigorifique%20et%20pompe%20à%20chaleur%20>
- [19] *Thermodynamics: An Engineering Approach* de Yunus A. Cengel et Michael A. Boles.
- [20] <https://www.mdpi.com/1996-1073/15/23/8782>
- [21] *Refrigeration and Air Conditioning* de C.P. Arora - Ce livre est un ouvrage spécifique sur la réfrigération et l'air conditionné, et il fournit des informations détaillées sur le diagramme de Mollier et son application dans les cycles frigorifiques
- [22] <https://forums.futura-sciences.com/physique/813124-cop-dune-pompe-a-chaueur.html>
- [23] *Physical Chemistry* de Peter Atkins et Julio de Paula - Ce manuel aborde également les diagrammes thermodynamiques, incluant le diagramme PV, dans le contexte des systèmes chimiques

- [24] <https://physics.stackexchange.com/questions/191534/few-doubts-about-saturated-vapour-pressure-and-unsaturated-vapour-pressure>
- [25] [https://www.futura-sciences.com/maison/definitions/thermique-fluide-frigorigene-5754/?utm\\_source=chatgpt.com](https://www.futura-sciences.com/maison/definitions/thermique-fluide-frigorigene-5754/?utm_source=chatgpt.com)
- [26] ADEME (Agence de la Transition Écologique). "Les fluides frigorigènes : enjeux et alternatives", 2023. [www.ademe.fr](http://www.ademe.fr)
- [27] Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry, 6th Edition, Wiley-VCH, 2000.
- [28] [https://ilocis.org/fr/documents/ILO104\\_19.htm?utm\\_](https://ilocis.org/fr/documents/ILO104_19.htm?utm_)
- [29] <https://www.unep.org>
- [30] <https://climate.ec.europa.eu>
- [31] <https://www.cahiers-techniques-batiment.fr/article/un-rapport-sur-les-fluides-frigorigenes-inflammables.52084>
- [32] <https://www.froid.fr/>
- [33] <https://www.thermique-genie-climatique.com>
- [34] <https://www.friga-bohn.com>
- [35] <https://iifir.org/>
- [36] <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0927024821004347?utm>
- [37] <https://french.alibaba.com/g/plates-eutectics.html>
- [38] Mehling, H., & Cabeza, L. F. (2008). Heat and Cold Storage with PCM: An Up to Date Introduction into Basics and Applications. Springer.
- [39] <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0306261912008549?via%3Dihub>
- [40] Incropera, F. P., & DeWitt, D. P. (2007). Fundamentals of Heat and Mass Transfer (6th ed.). Wiley
- [41] Sevault, A., et al. (2012). Simulation of PCM integration in a refrigerated cabinet: Influence of heat exchanger geometry. Applied Thermal Engineering, 42, 155–162.
- [42] [https://www.researchgate.net/publication/342176773\\_The\\_Impact\\_of\\_Additives\\_on\\_the\\_Main\\_Properties\\_of\\_Phase\\_Change\\_Materials](https://www.researchgate.net/publication/342176773_The_Impact_of_Additives_on_the_Main_Properties_of_Phase_Change_Materials)
- [43] <http://fr.zhaoerchem.com/antibacterial-powder-nano-grade-silver-ion-antimicrobial-additive-silver-nanoparticles-product/>
- [44] <https://doi.org/10.1016/j.rser.2010.11.035>
- [45] <https://french.alibaba.com/product-detail/99-99-20-30nm-Pure-Nano-60811479258.html>
- [46] <https://www.ibu-tec.fr/blog/nanoparticules-et-oxyde-de-fer/>
- [47] <https://www.amazon.fr/nanotubes-carbone-multi-parois-qualit%C3%A9-recherche/dp/B0912RJ9BK>

- [48] <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0894177711003849>
- [49] ScienceDirect – DOI : 10.1016/j.rser.2009.01.024
- [51] DOI : 10.1016/j.renene.2011.07.042
- [52] B.C. Pak, Y.I. Cho, Hydrodynamic and heat transfer study of dispersed fluids with submicron metallic oxide particles, *International Journal of experimental Heat Transf.* 11. 151–170. 1998
- [53] Y. Xuan, Roetzel. Conceptions of heat transfer correlation of nanofluids *International Journal of Heat and Mass Transfer.* 43. 3701–3707. (2000)
- [54] U. Rea, T. McKrell, L.-w. Hu, J. Buongiorno. Laminar convective heat transfer and viscous pressure loss of alumina–water and zirconia–water nanofluids. *International Journal of Heat and Mass Transfer.* 52. 2042–2048. 2009
- [55] M. Corcione, Rayleigh-Benard convective heat transfer in nanoparticle suspensions, *International Journal of Heat Fluid.* 32. 65–77. 2011
- [56] Unité de Développement des Équipements Solaires (UDES), Rapport technique sur la maison solaire de Bou Ismaïl, Algérie, 2020.