

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université Kasdi Merbah d'Ouargla

Faculté des Sciences Appliquées

Département de Génie Mécanique



Mémoire présenté pour l'obtention du diplôme de master académique

Filière : Génie mécanique

Spécialité : Energétique

Thème :

**Etude d'une technique de stockage de la chaleur
pour le chauffage d'une serre agricole**

Présenté par :

BOUHSI Abdelkader et BELHIRANE Abdelbari

Soutenu le : 12/06/2023

Devant le Jury composé de :

| | | | |
|------------------------------|------------|-----------------|------------------|
| DERGHOUT Zoheir | MCB | Univ KMO | Président |
| KINA MOHAMMED ELSALEH | MAA | Univ KMO | Examineur |
| ACHOURI El hadj | MCB | Univ KMO | Encadreur |

Année universitaire : 2022 - 2023

Remerciements

Nous tenons tout d'abord à remercier Dieu qui nous a donné la santé, la volonté et le courage d'accomplir ce travail. Soyez humble et exprimez mes sincères remerciements à mes parents.

Mes sincères remerciements à M. Achouri El Hadj, Professeur à l'Université Kasdi Merbah – Ouargla, pour sa patience et son aide à faire face aux difficultés, à la réalisation des tâches et au suivi de ce travail à distance.

Je tiens à remercier les membres du jury pour l'honneur qu'ils m'ont fait en acceptant de lire et de juger cet ouvrage.

Un grand merci à tous ceux qui ont donné un coup de main de loin ou de près

Je tiens également à remercier tous les enseignants qui se sont intéressés à notre formation.

Dédicace

Tout d'abord, je remercie Dieu de m'avoir donné la force Je termine ce travail.

Je voudrais témoigner ma gratitude à ceux qui, de loin ou proche de celui qui m'a soutenu financièrement et moralement.

Je dédie donc ce travail :

À mes chers parents, que Dieu les protège et les protège pour moi.

À ma sœur et mes frères.

À tous mes amis.

À toutes mes familles, la famille Belhairane et la famille Oukadou.

BELHAIRANE ABDELBARI

Au nom de Dieu le Miséricordieux

Je dédie ce travail :

À mes chers parents qui m'ont toujours soutenu ainsi que mes
frères et sœurs

À toute ma famille, Bouhsi

À Abdelmalek, Yaakoub et tous mes amis

BOUHSI ABDELKADER

Table des matières

| | |
|-----------------------------|---|
| Introduction Générale | 1 |
|-----------------------------|---|

Chapitre I : Généralité sur les serres agricoles

| | |
|--|----|
| I.1. Introduction | 2 |
| I.2. Histoire de la serre agricole | 2 |
| I.3. Les serres agricoles | 3 |
| I.4. Intérêt de la serre | 3 |
| I.5. Composantes d'un abri serre | 3 |
| I.5.1. L'ossature (armature)..... | 3 |
| I.5.2. Les matériaux de couverture ou de l'enveloppe | 3 |
| I.5.3. Le verre | 4 |
| I.5.4. Les matériaux plastiques | 4 |
| I.6. Types de serres agricoles | 4 |
| I.6.1. Les serre tunnels | 4 |
| I.6.2. Les serres d'horticultures | 5 |
| I.6.3. La serre gonflable | 6 |
| I.6.4. La serre de multiplication..... | 6 |
| I.6.5. La serre multi chapelle | 7 |
| I.7. Caractéristiques des serres | 7 |
| I.7.1. Paramètres influents le climat sous serre | 7 |
| I.7.2. Orientation de la serre | 9 |
| I.7.3. Le vent..... | 10 |
| I.8. Le micro climat de la serre | 10 |
| I.8.1. Effet de serre..... | 10 |
| I.8.2. Aération..... | 10 |
| I.9. Conclusion | 11 |

Chapitre II : Techniques de stockage thermique

| | |
|--|----|
| II.1. Introduction..... | 12 |
| II.2. Stockage thermique | 12 |
| II.3. Méthode de stockage de l'énergie thermique | 12 |
| II.3.1. Stockage par chaleur sensible | 13 |
| II.3.2. Stockage par chaleur latente | 16 |
| II.3.3. Stockage thermochimique..... | 18 |
| II.4. Stockage de chaleur à l'aide de matériaux à changement de phase (MCP) | 21 |
| II.4.1. Choix d'un matériau à changement de phase | 21 |
| II.4.2. Types de matériaux à changement de phase (MCP)..... | 23 |
| II.4.3. Les avantages et inconvénients des différents types de MCP..... | 25 |
| II.5. Stockage de chaleur dans des réservoirs d'eau | 26 |
| II.5.1. Les avantages et les inconvénients | 26 |
| II.6. Stockage de la chaleur de gravier | 26 |
| II.7. Conclusion..... | 27 |

Chapitre III : Résultats et discussions

| | |
|--|----|
| III .1. Introduction..... | 28 |
| III.2 Problème physique | 28 |
| III.3. Matériau à changement de phase utilisé..... | 28 |
| III.4. Présentation de l'ANSYS | 30 |
| III.4.1. Introduction sur la simulation | 30 |
| III.5. Modèle Mathématique..... | 30 |
| III.5.1. Modèle dynamique | 30 |
| III.6 Condition initiale et aux limites..... | 31 |
| III.6.1. Condition initiale..... | 31 |

| | |
|---|----|
| III.6.2. Conditions aux limites | 31 |
| III.7. Simulation numérique | 32 |
| III.7.1. Création de la géométrie..... | 32 |
| III.7.2 Maillage de la serre | 33 |
| III.7.3. Calcul numérique | 33 |
| III.8. Matériel informatique..... | 36 |
| III.9. Validation expérimentale..... | 36 |
| III.9.1. Test de maillage | 36 |
| III.10. Résultats et discussions..... | 37 |
| III.10.1. Intégration des matériaux a changement de phase | 37 |
| III.10.2. Distrubution de la température dans la serre..... | 38 |
| III.11. Conclusion | 42 |
| Conclusion générale | 43 |

Nomenclatures

| | | |
|--------------|---|-----------------------|
| C_p | Capacité calorifique massique | [J/kg. K] |
| m | masse | [kg] |
| T | Température | [K] |
| H | Enthalpie | [J] |
| L_f | Chaleur latente (fusion) | [J/kg] |
| L_v | Chaleur latente (vaporisation) | [J/kg] |
| C_{p_s} | Capacité de masse thermique du corps à l'état solide | [J/kg. K] |
| C_{p_l} | Capacité de masse thermique du corps à l'état liquide | [J/kg. K] |
| n | Nombre de moles | [mol] |
| ΔH_r | Enthalpie de la réaction | [J/mol] |
| λ | Conductivité thermique | [W/m.K] |
| t | Temps | [s] |
| Q | Densité de flux de chaleur | [W/m ²] |
| ρ | Densité du matériau | [kg/m ³] |
| P | Puissance | [W] |
| f_i | Fraction liquide surface | |
| p | Pression | [Pa] |
| h | Coefficient de convection | [W/m ² .K] |
| μ | Viscosité dynamique | [kg/m. s] |
| β | Coefficient de dilatation thermique | [K ⁻¹] |
| P | Pression | [N/m ²] |
| S_m | Terme source de l'équation de mouvement | [N/m ³] |

| | | |
|---------------|--------------------------------------|-------------------|
| S_e | Terme source de l'équation d'énergie | $[J/m^3 \cdot s]$ |
| v | Vitesse du fluide | $[m/s]$ |
| u | Vitesse du fluide | $[m/s]$ |
| μ | Viscosité dynamique | $[kg/m.s]$ |
| ε | Constante de calcul | |

Abréviations

| | |
|-------|--------------------------------------|
| MCP | Matériaux à Changement de Phase |
| PCM | Phase Change Material |
| TES | Thermal Energy Storage |
| SHTES | Sensible Heat Thermal Energy Storage |
| LHS | Latent Heat Storage |
| SHS | Sensible Heat Storage |

Liste des figures

| | |
|--|----|
| Figure I.1. Serre agricole..... | 2 |
| Figure I.2. Serre tunnel | 4 |
| Figure I.3. Serre d'horticulture..... | 5 |
| Figure I.4. Structure d'une Serre d'horticulture multi chapelles et multi modules..... | 5 |
| Figure I.5. Serre gonflable..... | 6 |
| Figure I.6. Serre de multiplication..... | 6 |
| Figure I.7. Multi chapelle..... | 7 |
| Figure I.8. Schéma simplifié de la photosynthèse..... | 8 |
| Figure I.9. Schéma du cycle de la photosynthèse et de la respiration chez la plante..... | 9 |
| Figure I .10. Différents modes d'aération latérale des serres..... | 11 |
| | |
| Figure II. 1. Méthodes possibles de stockage réversible de la chaleur..... | 13 |
| Figure II. 2. Variation d'enthalpie d'un fluide lors d'un chauffage ou d'un refroidissement sensible..... | 13 |
| Figure II. 3. Différentes étapes lors d'un stockage par chaleur latente..... | 17 |
| Figure II. 4. Processus de charge, de décharge et de stockage d'un système de stockage thermochimique..... | 19 |
| Figure II. 5. Classification des systèmes de stockage par sorption et par réaction chimique. | 20 |
| Figure II.6. Schémas expliquent de décharge de l'énergie..... | 21 |
| Figure II. 7. Chaleur latente en fonction de la température de fusion des grandes familles de MCP..... | 23 |
| Figure II.8. Classification des MCP..... | 23 |
| Figure II.9. Stockage de chaleur dans des réservoirs d'eau..... | 26 |

| | |
|---|----|
| Figure II.10. Stockage dans le lit de galet à l'intérieur de la serre..... | 27 |
| Figure III. 1. Dimensions du modèle physique étudié..... | 28 |
| Figure III. 2. Conditions aux limites pour un système isolé..... | 32 |
| Figure III. 3. Création de la géométrie dans DESIGN MODELER..... | 33 |
| Figure III. 4. Création du maillage dans MESHING..... | 33 |
| Figure III. 5. Interface de Fluent avec les paramètres du solveur utilisé..... | 34 |
| Figure III. 6. Constante de Darcy utilisée..... | 35 |
| Figure III. 7. Facteurs de sous relaxation..... | 35 |
| Figure III.8. Variation de la température moyenne à l'intérieur de la serre pour différents éléments de maillage..... | 37 |
| Figure III.9. Placement du MCP à l'intérieur de la serre..... | 38 |
| Figure III.10. Coupes transversales pour le tracé des contours..... | 38 |
| Figure III.11. Distribution de la température dans la serre (sans MCP)..... | 39 |
| Figure III.12. Distribution de la température dans la serre avec MCP (Configuration 1)..... | 40 |
| Figure III.13. Distribution de la température dans la serre avec MCP (Configuration 3)..... | 41 |
| Figure III.14. Variation horaire de la température à l'intérieur de la serre avec et sans MCP | 42 |

Liste des tableaux

| | |
|---|----|
| Tableau II. 1. Chaleur spécifique et capacité thermique volumétrique pour différents matériaux (valeur moyenne sur la plage de température [4 °C – 100 °C] et P= 0,1 MPa) | 15 |
| Tableau II. 2. Principales propriétés pour choix des MCP..... | 18 |
| Tableau II.3. Avantages et inconvénients des différents types de MCP..... | 25 |
| Tableau III. 1. Propriétés thermo-physiques de (la chlorure de calcium hexahydraté) Ca Cl ₂ 6H ₂ O..... | 29 |
| Tableau III.2. Maillages testés..... | 36 |

Introduction générale

Introduction Générale

La culture sous serre, connaît depuis quelques décennies un développement important, dû essentiellement à la croissance grimpante de la population et l'élévation continue de son Niveau de vie. Cet état de fait, entraîne une demande à la consommation de plus en plus Forte Et exigeante [1] .

La serre est conçue à l'origine comme un simple abri, ou une enceinte destinée à la Culture ou à la protection des plantes en exploitant le rayonnement solaire, elle est Devenue un local industriel de production de la matière végétale ou l'on tente D'adapter l'environnement immédiat de la plante, de façon à améliorer sa productivité Et sa qualité, en l'affranchissant du climat extérieur, du sol local et même des saisons [1].

Le chauffage des serres devient l'une des activités les plus énergivores en hiver. Les serres peuvent protéger les plantes Du gel en hiver et accélérer la croissance. Cependant, pour une haute Rendements, temps de culture court, amélioration de la qualité et de la quantité des Produits, les usines ont généralement encore besoin de chauffage à combustible fossile, en particulier Pendant les nuits d'hiver [2].

Les serres sont un excellent moyen de conserver la chaleur et d'améliorer la croissance des plantes en utilisant des techniques de stockage de chaleur.

Ce type de serres, équipées et matérialisées par un appui climatique ; sont un moyen Permettant de transformer les conditions extérieures locales, en un microclimat Opérationnelle, favorable à la croissance et au développement des cultures abritées. Le progrès technologique a œuvré considérablement au développement des serres Agricoles [1].

Dans ce travail, nous utilisons Ansys Fluent, le programme d'ingénierie spécialisé dans la dynamique des fluides computationnelle (CFD). Il est utilisé pour modéliser et simuler différents types d'écoulement de fluide et de transfert de chaleur en eux.

Le but de ce travail est de savoir comment étudier la technologie de stockage de chaleur pour le chauffage des serres agricole. Où il est présenté sur un mémoire qui comporte en plus d'une introduction générale trois chapitre répartis comme suit :

- ✓ Le premier chapitre est réservé pour un étude générale de la serre agricole
- ✓ Le deuxième chapitre donne un aperçu sur les techniques de stockage thermique.
- ✓ Le troisième chapitre présente les résultats obtenus et leurs discussions.

Enfin, nous terminerons par une conclusion générale.

Chapitre I

Généralité sur les serres agricoles

I.1. Introduction

La serre est un environnement très confiné où plusieurs composants sont échangés. Les serres agricoles jouent un rôle essentiel dans la production alimentaire moderne, en offrant un moyen de cultiver des cultures de manière efficace, durable et résiliente aux conditions climatiques changeantes.

I.2. Histoire de la serre agricole

La serre est une construction destinée à abriter des cultures des plantes ornementale, légumières ou fruitières, et parfois dans un but expérimental ou didactique de toutes autres plantes, dans des conditions plus favorables ou plus sûres qu'en plein air [3].

La définition de la norme française NF U57-001, déc.1984 décrit la serre comme « une enceinte destinée à la culture ou à la production des plantes en exploitant à un homme 9 travailler aisément à l'intérieur »

Il a eu de divers changements en termes de consommation alimentaire dans ces pays dû à l'émergence d'une classe moyenne doté d'un pouvoir d'achat plus élevé. La population semble de plus en plus attirée par la consommation de légumes ou de fruits frais comme les épinards, les tomates, ou les fraises qui ne poussent pas forcément naturellement localement à cause des conditions climatiques. En effet, on constate une chaleur trop forte tout au long de l'année ainsi qu'un niveau d'humidité trop élevé. Le transport aérien faisant augmenter les prix, la culture sous serre apparait alors été une bonne solution pour répondre aux besoins du marché.

Une seconde étude a également été réalisée sur la Turquie les conditions climatiques s'avèrent moins humide qu'en Asie du Sud-est mais tout aussi chaude. La bonne gestion de l'eau devient alors un point clé [3].



Figure I.1. Serre agricole [4].

I.3. Les serres agricoles

Une serre est une structure close ou semi-ouverte translucide, en verre ou en plastique, soutenue par une structure métallique ou en bois, destinée en général à la culture ou à la protection des plantes en exploitant le rayonnement solaire, elle est devenue un local industriel de production de la matière végétale ou l'on tente d'adapter l'environnement immédiat de la plante. De façon à améliorer sa productivité et sa qualité, en l'affranchissant du climat extérieur, du sol local et même des saisons [5].

I.4. Intérêt de la serre

La serre de culture offre la possibilité de s'affranchir des contraintes climatiques extérieures (pluie, vent, froid).

Elle permet le chauffage de l'air et des racines, le contrôle de l'humidité. Elle joue un rôle économique en présentant des produits sur le marché en contre saison.

La serre permet ainsi d'obtenir une production végétale dans des conditions meilleures que celles existant naturellement par conséquent une meilleure que celles existant, il faut répondre minutieusement aux exigences de la culture pour les différents facteurs intervenants dans sa croissance et son développement, ceci suppose la connaissance des interactions entre ces divers paramètres [4].

I.5. Composantes d'un abri serre

D'une manière générale, la serre est composée de deux structures : une armature (ossature) qui constitue le squelette de l'abri, et une couverture (enveloppe) qui réalise l'écran nécessaire à la création d'un microclimat spécifique à la serre [6].

I.5.1. L'ossature (armature)

C'est la charpente de la serre, elle est un assemblage de cadres porteurs reliés par des pannes et des pièces de triangulation, les éléments porteurs peuvent être constitués par des profils différents, plus ou moins lourds, suivant le type de serre [6].

I.5.2. Les matériaux de couverture ou de l'enveloppe

Les matériaux de couverture ou d'enveloppe sont des matériaux utilisés pour recouvrir et protéger la toiture, les murs extérieurs et autres parties de l'enveloppe d'un bâtiment. Ces

matériaux peuvent être choisis pour leur esthétique, leur durabilité, leur résistance aux intempéries et leur facilité d'installation [6].

I.5.3. Le verre

Le verre est un matériau ou un alliage dur, fragile (cassant) et transparent à la lumière. Ils existent différents types de verre utilisés dans les serres à savoir : le verre transparent ou clair (appelé verre horticole), le verre martelé ou cathédrale (verre horticole coulé) [6].

I.5.4. Les matériaux plastiques

Les matières plastiques couvrent une gamme très étendue de matériaux polymères Synthétiques ou artificiels. Dans le domaine des serres ces matériaux plastiques sont transparents à la lumière visible. Deux types sont utilisés : Les matériaux plastiques rigides : On peut citer quatre type principaux de ce type de plastique rigide : Le polyester armé de fibres de verre (PRV), le chlorure de polyvinyle bi orienté (PVC bi orienté), le polycarbonate (PVC), le poly méthacrylate de méthyle (PMMA) [6].

I.6. Types de serres agricoles

I.6.1. Les serre tunnels

Les matériaux de couverture ou d'enveloppe sont des matériaux utilisés pour recouvrir et protéger la toiture, les murs extérieurs et autres parties de l'enveloppe d'un bâtiment. Ces matériaux peuvent être choisis pour leur esthétique, leur durabilité, leur résistance aux intempéries et leur facilité d'installation [7].



Figure I.2. Serre tunnel [7].

I.6.2. Les serres d'horticultures

Effet, la chapelle est l'unité de base de construction de la serre. Elle est composée de deux parois latérales verticales, ou très légèrement inclinées, et d'un toit à deux pentes symétriques. Cette conception permet d'optimiser la lumière naturelle en laissant entrer la lumière du jour par le toit tout en offrant une protection contre les intempéries.

La largeur d'une chapelle varie en fonction des besoins de production, mais les dimensions courantes sont d'environ 3, 6, 9, 12 et 16 mètres. Les dimensions de la chapelle ont un impact sur la surface totale de la serre, ainsi que sur sa hauteur, sa ventilation et sa structure de support [7].



Figure I.3. Serre d'horticulture.

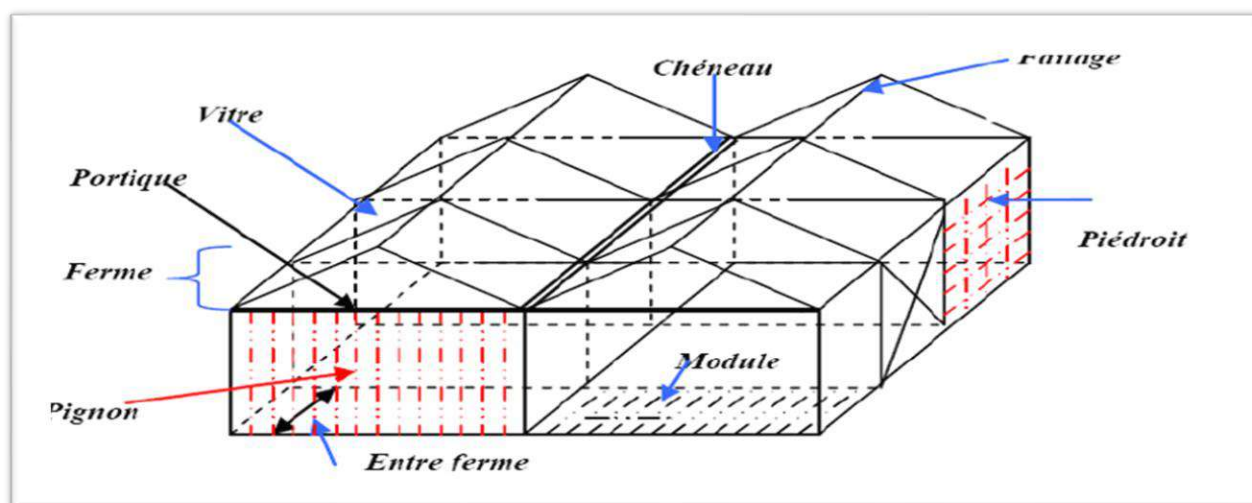


Figure I.4. Structure d'une Serre d'horticulture multi chapelles et multi modules [8].

I.6.3. La serre gonflable

La serre gonflable est une serre dont les parois sont flexibles de manière où son vrai volume avec l'état de son climat change (la température élevée provoque une détente qui fait augmenter la pression totale intérieure, la condensation de la vapeur d'eau diminue la pression totale, et provoque une dépression) par conséquent la paroi se rabat sur l'armature de la serre [9].



Figure I.5. Serre gonflable [7].

I.6.4. La serre de multiplication

Serre de multiplication est une structure spécialement conçue pour la production rapide et efficace de plantes à partir de semences. Les serres de multiplication sont souvent utilisées dans l'industrie horticole pour produire des plants à grande échelle, en particulier pour les cultures de légumes et de fleurs [9].



Figure I.6. Serre de multiplication.

I.6.5. La serre multi chapelle

La Serre Multi chapelle est constituée de nefs adossées avec une couverture elliptique et des parois latérales verticales. Il s'agit d'une serre très polyvalente qui s'adapte parfaitement à tous types de climats et de cultures et permet d'adapter la largeur de chaque chapelle au cadre de plantation des cultures [10].

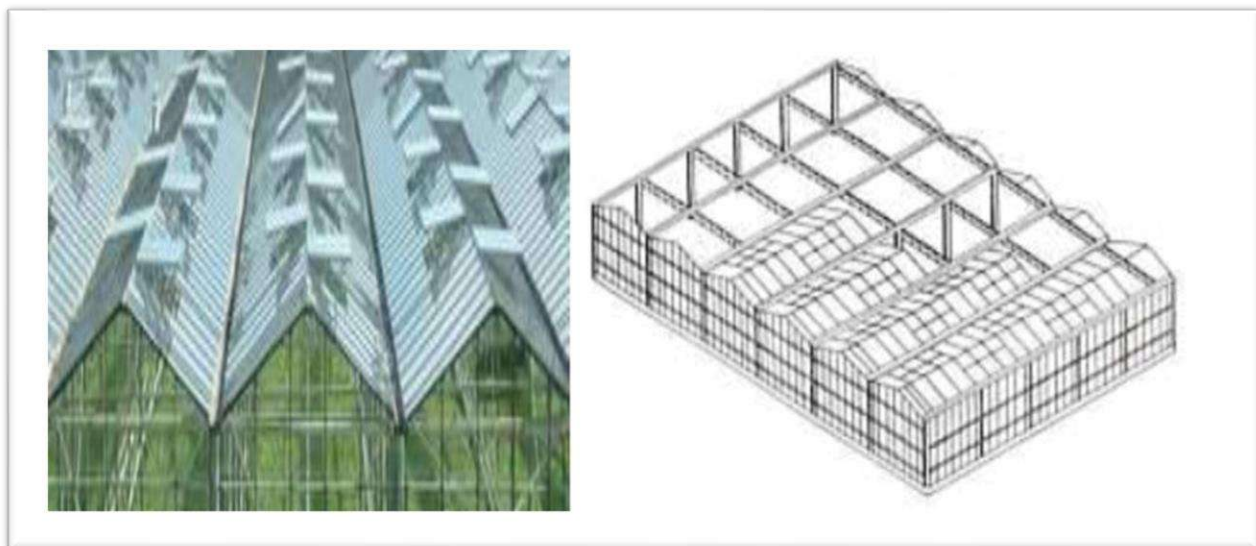


Figure I.7. Multi chapelle [10].

I.7. Caractéristiques des serres

I.7.1. Paramètres influents le climat sous serre

❖ Température

La température sous serre est le paramètre le plus important pour la production des cultures sous serre. Il se décompose en trois types :

- Température issue du sol.
- Température de la plante.
- Température ambiante à la culture [6].

❖ Humidité

Le confinement et l'étanchéité de la serre favorisent l'augmentation de l'humidité absolue tandis que l'élévation de la température de l'air tend à accroître le déficit de la saturation. Les conséquences de l'humidité sont :

Pendant le jour : L'élévation de la température de l'air peut entraîner un abaissement exagéré de son humidité relative et provoquer un véritable "stress hydrique" au niveau de la végétation d'où la nécessité de prévoir un système de ventilation de la serre. Pendant la nuit: Les serres étant généralement fermées, l'humidité relative est élevée. } Au cours de la nuit, la température baisse. Il se produit fréquemment des condensations sur les parois et les gouttes condensées peuvent tomber sur la végétation (Conditions favorables au développement des certaines maladies...) [5].

❖ La lumière

Les conditions d'éclairement à l'intérieur d'une serre sont étroitement liées aux conditions lumineuses naturelles, qui peuvent varier en fonction de la région géographique, de la saison et des conditions météorologiques. Le choix des matériaux de couverture de la serre peut affecter la quantité et la qualité de la lumière qui pénètre dans la serre, ainsi que les conditions thermiques et hygrométriques à l'intérieur [9].

❖ Photosynthèse

La photosynthèse représente l'inversion de la combustion du glucose (respiration). Cette réaction est endothermique et nécessite de l'énergie lumineuse.

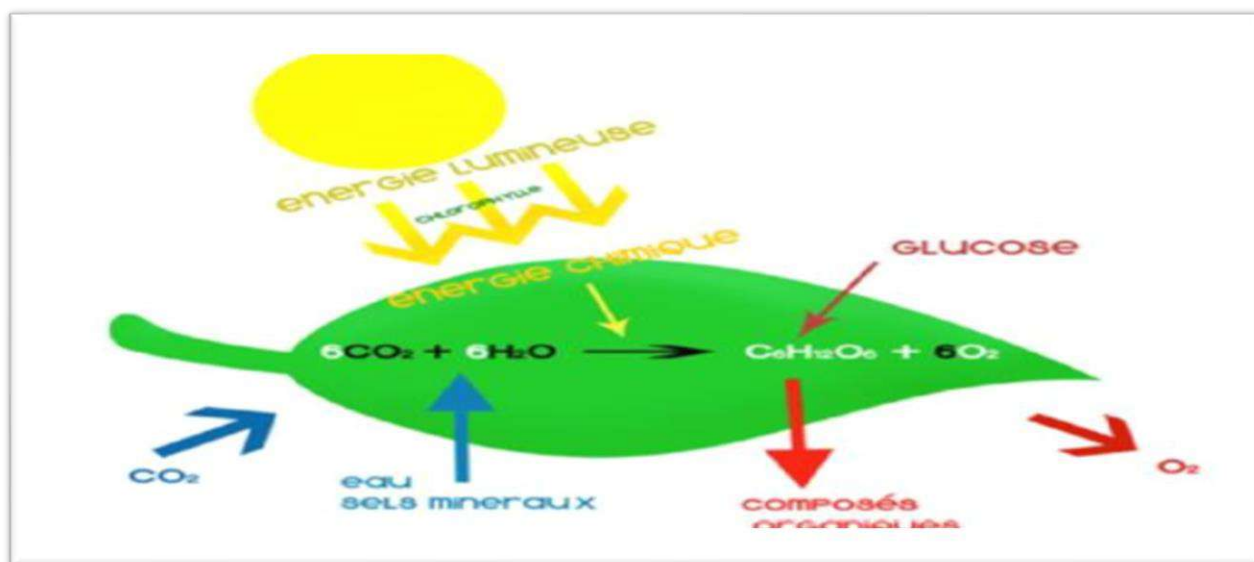


Figure I.8. Schéma simplifié de la photosynthèse [6].

La photosynthèse est très importante pour la production végétative. Remarquons dans l'équation précédente que le dioxyde de carbone est obtenu à partir de l'air puis converti à l'aide de l'eau et de l'énergie lumineuse en glucose et en oxygène [6].

❖ Teneur en CO₂

Le dioxyde de carbone (CO₂) est un élément clé de la photosynthèse chez les plantes vertes. Les plantes absorbent le CO₂ de l'atmosphère à travers les stomates, qui sont des petits trous présents sur les feuilles et les tiges des plantes. Le CO₂ est ensuite utilisé pour produire des sucres et de l'oxygène, grâce à l'énergie lumineuse captée par la chlorophylle présente dans les cellules chlorophylliennes [6].

❖ Respiration

Pour la respiration (mode nuit), il s'agit du cycle inverse pendant lequel la plante absorbe de l'oxygène (O₂) et rejette du dioxyde de carbone (CO₂), comme un humain (mais dans des proportions différentes bien évidemment). Ce phénomène est une réaction exothermique et ne nécessite pas de l'énergie lumineuse [6].

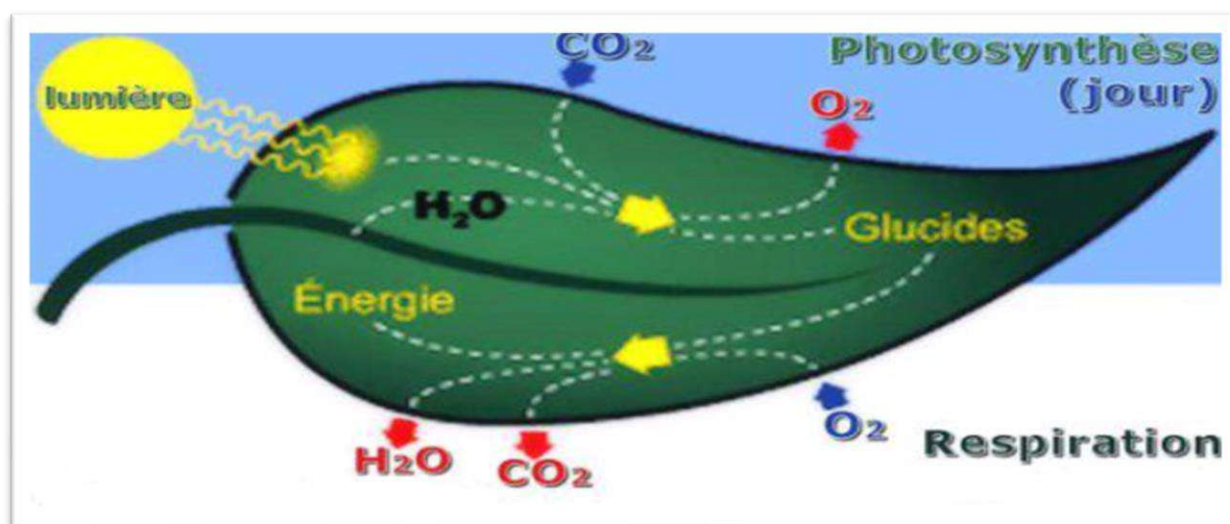


Figure I.9. Schéma du cycle de la photosynthèse et de la respiration chez la plante [6].

I.7.2. Orientation de la serre

Le réglage de l'orientation de la serre selon la course du soleil ainsi que selon la direction des vents a causé des difficultés pour éviter l'hétérogénéité de certaines conditions climatiques à l'intérieur de la serre. Dans la région méditerranéenne, où le soleil s'élève sur l'horizon, les vérifications ont montré que l'éclairement solaire satisfaisant pouvait s'obtenir par l'adaptation d'une orientation nord-sud. La comparaison entre le matin et le soir a montré que cette orientation permet d'avoir une meilleure homogénéité du flux lumineux. Compte tenu de la direction générale Nord-sud des vents dominants, cette orientation a l'avantage de réduire les

effets néfastes des vents tant sur la structure que sur les déperditions énergétiques de la serre [5].

I.7.3. Le vent

Le vent est considéré comme un déplacement d'air s'effectuant surtout horizontalement. Ce déplacement peut être caractérisé par sa vitesse et sa direction. Dans les stations météorologiques, la vitesse et la direction sont mesurées à dix mètres au-dessus du sol. La vitesse diminue lorsque l'on se rapproche du sol et il est possible de calculer sa moyenne à une hauteur h au-dessus du sol en connaissant la vitesse de référence à 10 m (Selon la formule d'Hellman) [11].

I.8. Le micro climat de la serre

Le microclimat d'une serre peut être influencé par plusieurs facteurs tels que la taille et la forme de la serre, la densité de plantation, la ventilation, l'humidité, la température, l'éclairage, le type de culture, le substrat utilisé, et la disponibilité en nutriments.

En général, les serres sont conçues pour maintenir des conditions climatiques optimales pour la croissance des plantes [7].

I.8.1. Effet de serre

La couverture de la serre est transparente. Elle laisse bien passer la lumière, elle emprisonne la chaleur qui se forme à l'intérieur (effet de serre), sous l'action des rayonnements solaires et s'oppose aux déperditions. La couverture transparente de la serre joue le même rôle que l'atmosphère de la planète. L'effet de serre est donc le phénomène de réchauffement de la serre dû à la perméabilité de la couverture à certaines radiations solaires incidentes [8].

I.8.2. Aération

L'aération se fait par ventilation et qui consiste à un échange d'air entre le milieu serre et l'extérieur, ce mécanisme permet d'évacuer la chaleur en excès pour diminuer la température de l'air ambiant ; de modifier l'humidité en évacuant plus ou moins rapidement l'air humide provoqué par la transpiration des plantes [8].

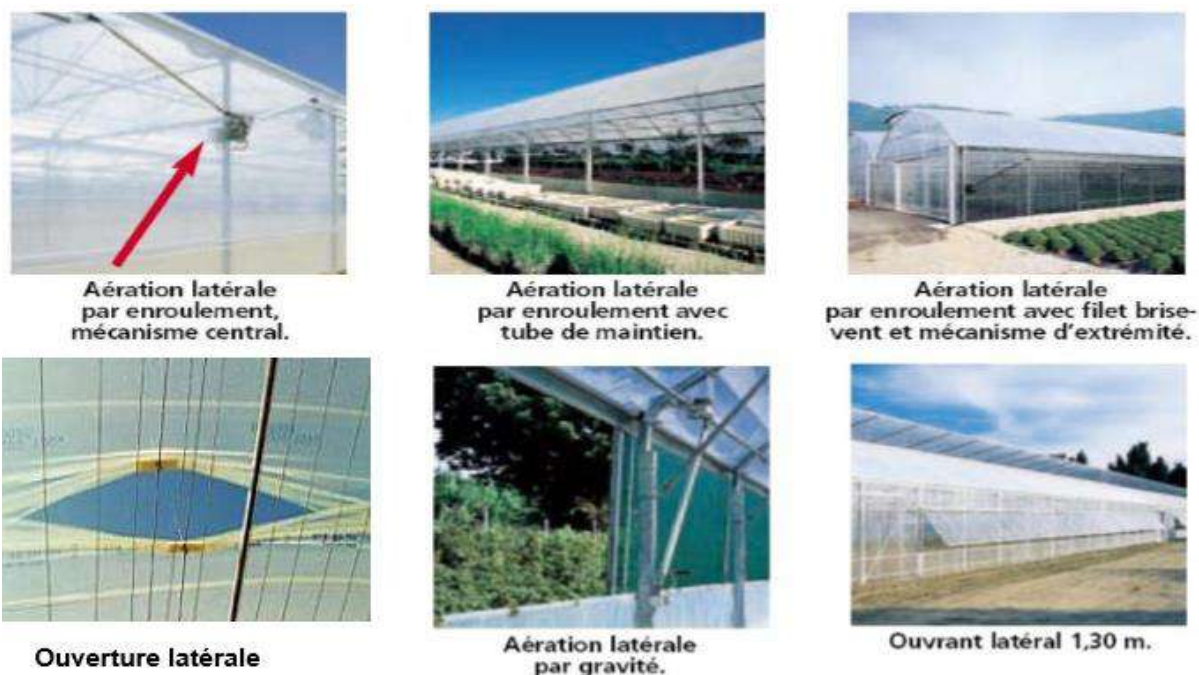


Figure I .10. Différents modes d'aération latérale des serres [7].

I.9. Conclusion

Les serres jouent un rôle essentiel dans l'amélioration de la productivité et de la durabilité de l'agriculture à l'époque moderne.

Les serres offrent un environnement hermétique pour la culture des plantes, permettant aux producteurs d'obtenir de nombreux avantages.

Ces structures permettent de prolonger la période de croissance des cultures, de fournir des conditions optimales pour leur croissance et leur développement et de les protéger des facteurs météorologiques néfastes, des ravageurs et des maladies.

Chapitre II : Techniques de stockage thermique

II.1. Introduction

La technique de stockage consiste à emmagasiner la chaleur dans les différents matériaux que l'on trouve dans les serres agricoles afin de stocker la chaleur et de la réutiliser plus tard pour le chauffage. Cette technologie est généralement utilisée dans les régions à climat froid ou pendant les saisons froides pour économiser de l'énergie et réduire les coûts.

La chaleur peut être stockée en utilisant une variété de méthodes telles que le stockage de la chaleur dans le sol, l'eau, les étangs, les fosses, les murs ou bien en utilisant des MCP comme matériaux de stockage.

II.2. Stockage thermique

Le stockage de l'énergie fait référence à la capacité de stocker de l'énergie pour une utilisation ultérieure, généralement lorsque l'énergie est plus disponible ou moins chère. Cela peut être réalisé de différentes manières, en fonction du type d'énergie que l'on souhaite stocker [12].

Le stockage d'énergie thermique (TES) est réalisé par la variation de température d'une substance (chaleur sensible), le changement de phase d'une substance (chaleur latente), et la réaction thermochimique du milieu de stockage.

Dans le TES à chaleur sensible, la quantité d'énergie stockée (Q en J) est liée à la masse (m), à la variation de température (ΔT) du matériau de stockage. Dans le système TES à chaleur latente, outre la masse de l'unité de stockage, la chaleur latente de fusion est la propriété thermo physique critique de l'unité de stockage [13].

II.3. Méthode de stockage de l'énergie thermique

Les méthodes de stockage d'énergie thermique (TES) sont couramment utilisées pour les applications de chauffage / refroidissement résidentielles ou commerciales ou pour fournir une production d'électricité continue dans les centrales à base d'énergie renouvelable. Les systèmes TES fournissent non seulement un équilibre entre l'offre et la demande, mais augmentent également les performances et la fiabilité des systèmes énergétiques.

Les techniques utilisées pour les applications de chauffage ou de refroidissement sont le stockage de chaleur sensible, le stockage de chaleur latente et le stockage de chaleur thermochimique [14].

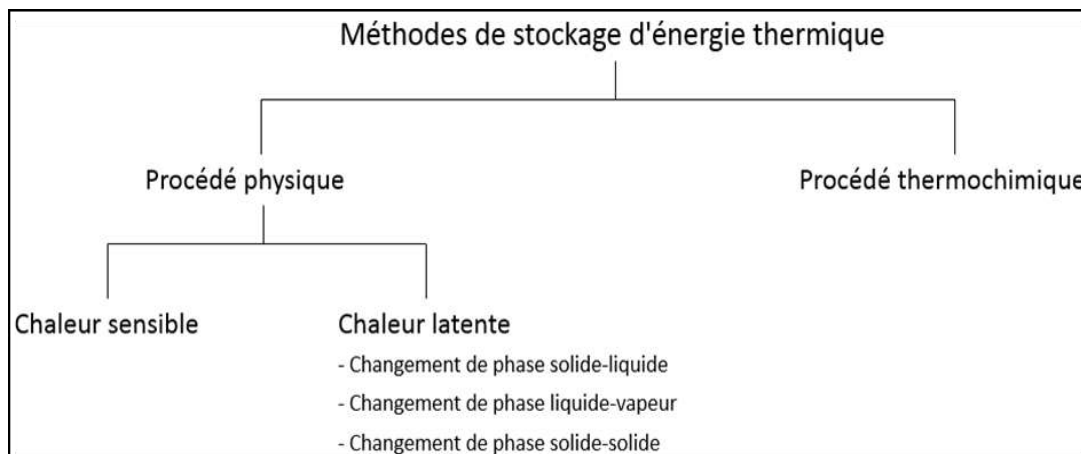


Figure II. 1. Méthodes possibles de stockage réversible de la chaleur [13].

II.3.1. Stockage par chaleur sensible

Le stockage de chaleur sensible est obtenu en augmentant ou en diminuant la température du milieu de stockage. Un cycle typique de système de stockage d'énergie thermique à chaleur sensible (SHTES) implique des processus de chauffage et de refroidissement sensibles comme indiqué dans la figure II. 2. [14]

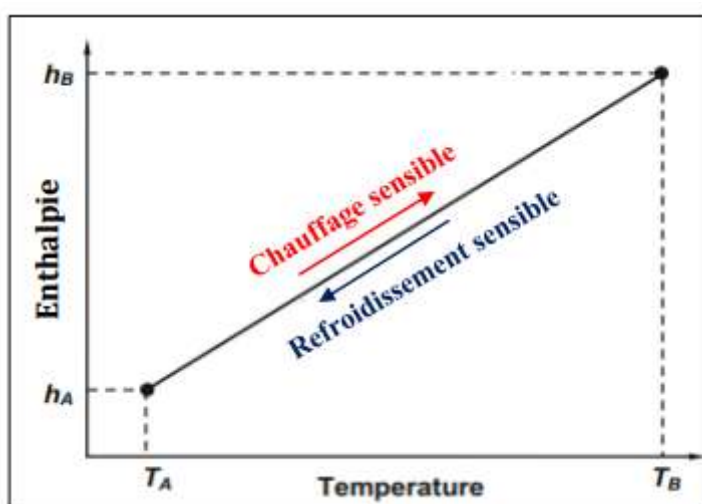


Figure II. 2. Variation d'enthalpie d'un fluide lors d'un chauffage ou d'un refroidissement sensible [13].

Le processus de chauffage augmente l'enthalpie du milieu de stockage. Pour un support de stockage incompressible, la quantité de chaleur emmagasinée dans le système dépend de la chaleur spécifique (C_p en J / kg. K) du fluide, de la différence de température (ΔT) et de la masse du support de stockage (m en kg). La variation d'énergie totale d'un système SHTES peut être définie comme suit :

$$\Delta E = \int_{h_A}^{h_B} mdh = m(h_B - h_A) \quad (\text{II.1})$$

$$\Delta E = \int_{h_A}^{h_B} mC_p dT = mC_p(h_B - h_A)$$

$C_p(T) = C^{ste}$, et la relation devienne :

$$m(h_B - h_A) = mC_p(T_B - T_A) \quad (\text{II.2})$$

Si :

$T_B > T_A$ Le stockage est du chaud.

$T_A > T_B$ Le stockage est du froid.

La méthode de stockage par chaleur sensible consiste à stocker une énergie thermique par la variation de la température d'un matériau. Les matériaux utilisés peuvent être à l'état solide comme le béton ou la brique ou à l'état liquide comme l'eau. Les gaz ont une très faible capacité thermique volumétrique et ne sont pas utilisés pour le stockage de chaleur sensible [15].

On a donc deux types de stockage par chaleur sensible :

Stockage sensible de la chaleur par un matériau liquide.

Stockage sensible de la chaleur par un matériau solide.

II.3.1.1 Matériaux utilisés pour un stockage sensible

Le stockage sensible de chaleur par un matériau liquide est une technique utilisée pour stocker et libérer de l'énergie thermique. Ce processus repose sur les propriétés de chaleur spécifique élevée des liquides, ce qui leur permet de stocker une grande quantité d'énergie thermique par unité de masse [16].

L'eau est chauffée ou refroidie pour stocker l'énergie thermique. Lorsqu'une source d'énergie, comme un capteur solaire ou une centrale thermique, produit de la chaleur, elle est utilisée pour chauffer l'eau, augmentant ainsi sa température. Cette eau chaude peut ensuite être stockée dans des réservoirs isolés thermiquement jusqu'à ce que l'énergie thermique soit nécessaire [17].

Stockage sensible de la chaleur par un matériau solide : Les matériaux de stockage solides sont principalement préférés pour répondre aux besoins de stockage thermique dans les applications de chauffage des locaux et de chauffage à haute température. Habituellement, les matériaux de stockage solides utilisés pour ces applications peuvent être exploités à des températures allant de 40 à 75° C pour les lits rocheux / béton et de plus de 150 ° C pour les métaux [18].

| Matériau | Chaleur spécifique Cp (J/kg.K) | Capacité thermique volumétrique (kJ/m ³ .K) |
|----------------|-----------------------------------|---|
| Eau | 4200 | 4200 |
| Fer | 500 | 3600 |
| Cuivre | 400 | 3500 |
| Paraffine | 2900 | 2600 |
| Aluminium | 900 | 2500 |
| Or | 100 | 2500 |
| Verre | 800 | 2200 |
| Béton | 800 | 2100 |
| Granit | 800 | 2100 |
| Huile | 2000 | 2000 |
| PVC | 1000 | 1300 |
| Sable | 800 | 1200 |
| Brique | 800 | 1200 |
| Bois | 1800 | 900 |
| Laine de verre | 700 | 30 |

Tableau II. 1. Caractéristiques thermique moyennes de différents matériaux (T= 4°C-100°C et P= 0,1 MPa) [19].

II.3.2. Stockage par chaleur latente

Le stockage de chaleur latente (LHS) est basé sur le dégagement de chaleur ou l'absorption de chaleur pendant le changement de phase d'un matériau de stockage du solide au liquide ou du liquide au gaz ou vice versa. Les MCP (paraffine, hydrates de sel et sels fondus) présentent un avantage visible par rapport aux matériaux de stockage de chaleur sensible.

Le stockage de chaleur latente (LHS), par rapport au stockage de chaleur sensible (SHS), offre une densité de stockage d'énergie plus élevée avec des changements de température proches de zéro. Cependant, des difficultés surviennent généralement en réalité en raison du faible changement de densité, de la conductivité thermique, du sous-refroidissement des matériaux à changement de phase, de la stabilité des propriétés sous cyclage prolongé et parfois de la ségrégation de phase. Les matériaux à changement de phase sont spécifiquement utilisés dans les systèmes de stockage d'énergie thermique latente, et par conséquent, le MCP peut également être appelé matériau de stockage de chaleur latente. Le transfert d'énergie thermique du MCP se produit pendant le processus de charge ou de décharge (fusion ou solidification) au cours duquel l'état ou la phase du matériau passe de liquide à solide ou de solide à liquide. Au début du chauffage du matériau, la température du MCP augmente, en absorbant l'énergie thermique. Lorsque le matériau atteint une plage de température spécifique, il commence à fondre lorsque le matériau commence à subir une transition de phase de l'état solide à l'état liquide. Cependant, contrairement aux matériaux de stockage de chaleur sensible, pendant le processus de transition de phase, le MCP libère ou absorbe de la chaleur à une température constante ou presque constante. De nombreux auteurs ont expérimenté différents types de MCP en les subdivisant en types organiques, inorganiques et eutectiques [20].

La variation d'énergie totale d'un système LHS peut être définie comme suit :

$$\Delta E = \int_{T_1}^{T_f} mC_{ps} dT + mL_f + \int_{T_1}^{T_2} mC_{pl} dT \quad (\text{II.3})$$

Avec :

C_{ps} : Capacité thermique massique du corps à l'état solide (J/kg. K).

C_{pl} : Capacité thermique massique du corps à l'état liquide (J/kg. K).

L_f : Chaleur latente (J/kg).

$C_{ps} = C^{ste}$ et $C_{pl} = C^{ste}$, la relation ça devient :

$$m(h_2 - h_1) = mC_{ps} (T_f - T_1) + mL_f + mC_{pl} (T_2 - T_f) \tag{II.4}$$

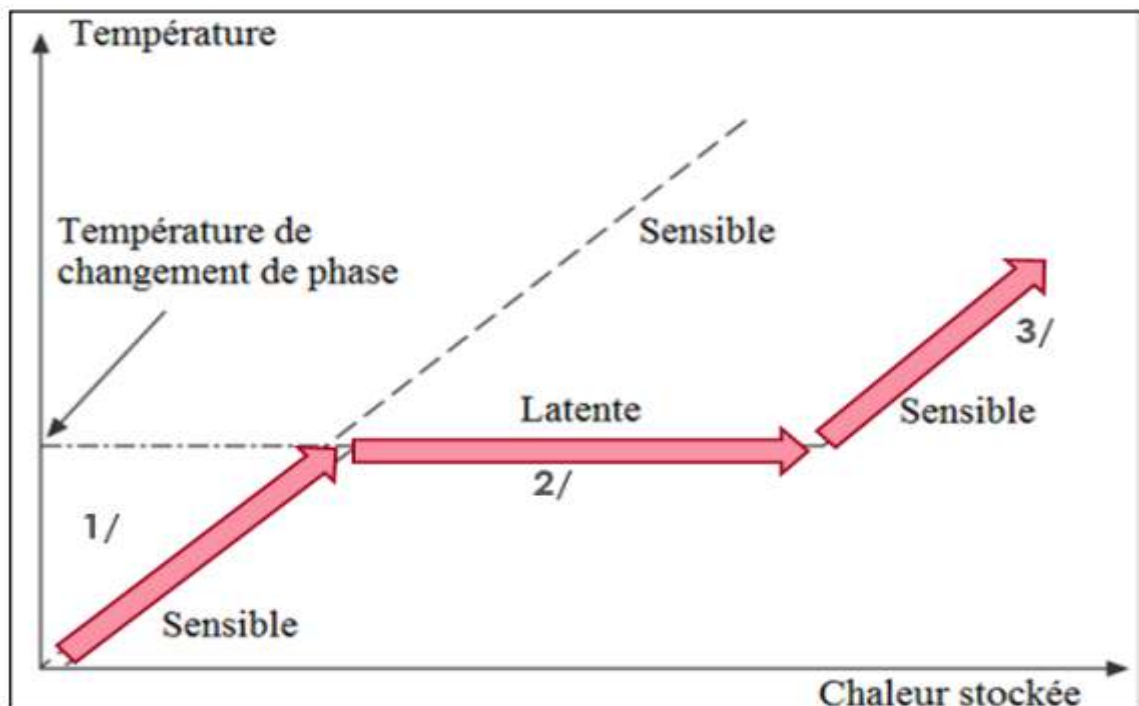


Figure II. 3. Différentes étapes lors d'un stockage par chaleur latente [13].

II.3.2.1. Matériaux utilisés pour un stockage latent

Les matériaux de stockage de chaleur latente sont appelés MCP. Le transfert d'énergie thermique se produit lorsqu'un matériau passe du solide au liquide ou du liquide au solide. Qui s'appelle un changement d'état. Ces MCP solides-liquides fonctionnent comme des matériaux de stockage sensible, leur température augmente à mesure qu'ils absorbent la chaleur. Contrairement aux matériaux de stockage sensibles, le MCP absorbe et libère de la chaleur à une température presque constante [21].

| | |
|-------------------------------|---|
| Propriétés thermiques | <ul style="list-style-type: none"> ❖ Température de transition de phase appropriée. ❖ Chaleur latente de transition élevée. ❖ Conductivité thermique élevée en phase liquide et solide. ❖ Bon transfert de chaleur. |
| Propriétés physiques | <ul style="list-style-type: none"> ❖ Équilibre de phase favorable. ❖ Haute densité. ❖ Petit changement de volume. ❖ Faible pression de vapeur. |
| Propriétés cinétiques | <ul style="list-style-type: none"> ❖ Pas de surfusion. ❖ Taux de cristallisation suffisant. |
| Propriétés chimiques | <ul style="list-style-type: none"> ❖ Stabilité chimique à long terme. ❖ Compatibilité avec les matériaux de construction. ❖ Aucun risque d'incendie. |
| Propriétés économiques | <ul style="list-style-type: none"> ❖ Abondantes. ❖ Disponibles. ❖ Rentables. |

Tableau II. 2. Propriétés principales pour un choix des MCP [21].

II.3.3. Stockage thermochimique

Dans un système de stockage d'énergie thermochimique, l'énergie est stockée après une réaction de rupture ou de dissociation des liaisons chimiques au niveau moléculaire qui libère de l'énergie puis récupérée dans une réaction chimique réversible. Semblable à l'autre type de systèmes de stockage d'énergie thermique, le système de stockage de chaleur thermochimique peut également subir des processus de charge, de stockage et de décharge [22].

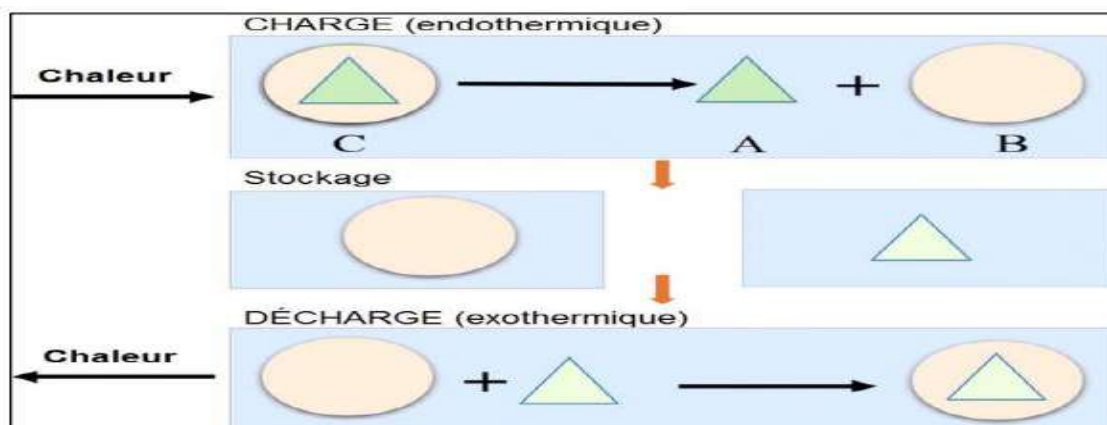
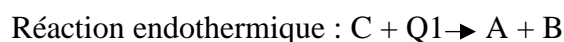


Figure II. 4. Processus de charge, de décharge et de stockage d'un système de stockage thermochimique [13].

Le stockage de chaleur thermochimique peut subir divers processus, notamment des réactions chimiques et photochimiques réversibles, la libération d'eau et d'hydrates et la production carburant.

Le principe de base du stockage thermochimique est :



La réaction doit être complètement réversible pour que le processus ne perde pas sa capacité de stockage au cours des cycles.

Dans le processus de charge, l'énergie thermique arrivée d'une source de chaleur permet la réaction endothermique de survenir, dans cette réaction les produit A et B sont séparés et stockés. Lorsqu'on veut restaurer cette énergie thermique, les produits A et B sont à nouveau en contact pour réaliser la réaction exothermique réversible et ainsi restaurer la chaleur stockée et régénérer le produit C.

La quantité d'énergie stockée dans une réaction chimique est exprimée dans la relation suivante

$$E = \sum_{i=1}^N \int_{T_i}^{T_f} m_i \cdot dT \cdot C_{pi} \cdot dT + n_A \times \Delta H_r \tag{II.5}$$

Avec :

E : la quantité d'énergie stockée (J).

n_A : le nombre de moles du produit A (mol)

ΔH_r : l'enthalpie de la réaction (J.mol-A)

Le stockage par sorption et le stockage chimiques sont les deux grands domaines nécessaires à la réalisation de travaux de recherche actifs et potentiels pour charger et décharger efficacement l'énergie disponible. Les phénomènes de stockage par sorption peuvent être classés en stockage par adsorption et par absorption (Figure II. 5).

De même, le stockage chimique peut être rendu efficace grâce aux phénomènes électrochimiques, électromagnétiques, thermochimiques sans sorption, d'adsorption chimique et d'absorption chimique [23].

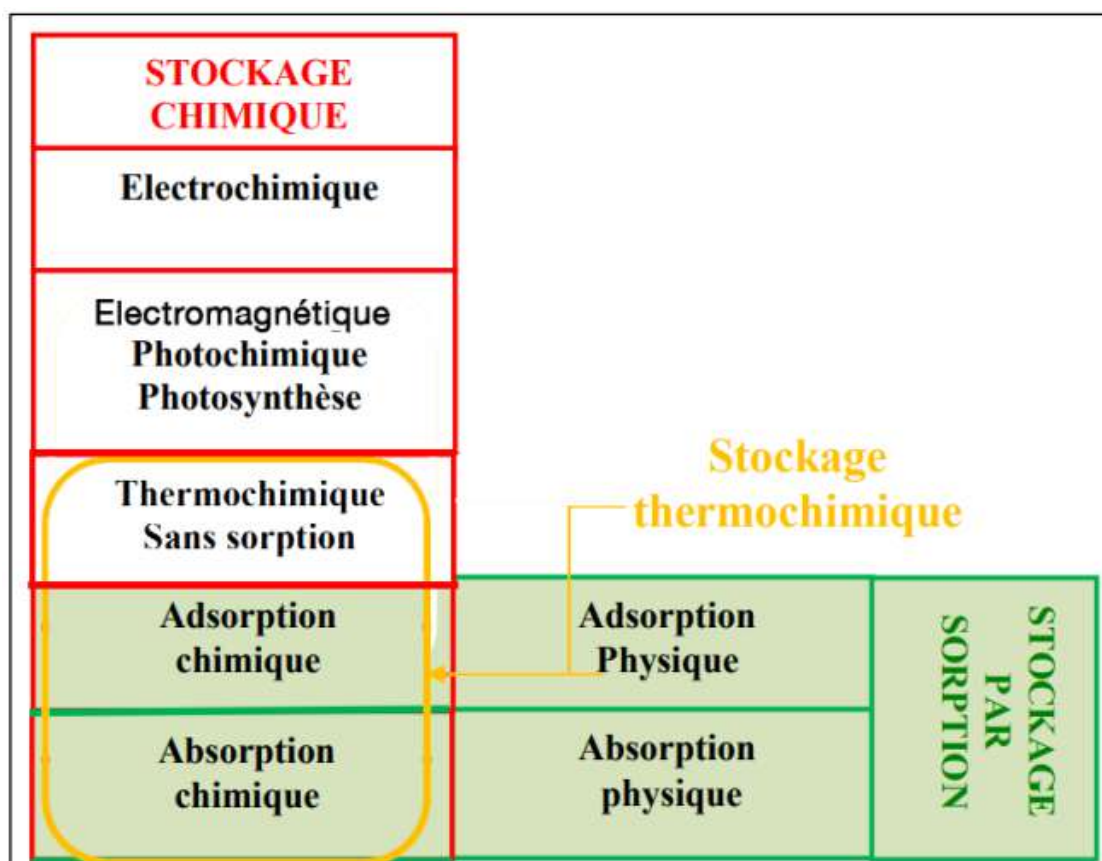


Figure II. 5. Classification des systèmes de stockage par sorption et par réaction chimique [13].

II.4. Stockage de chaleur à l'aide de matériaux à changement de phase (MCP)

Un matériau à changement de phase (MCP) est un matériau qui change de phase à une certaine température. Pendant le processus de changement de phase, un MCP absorbe ou libère une grande quantité de chaleur afin d'effectuer la transformation. Cette action est connue sous le nom de chaleur latente de fusion (L_f) ou de vaporisation (L_v), et grâce à ce processus, l'énergie est stockée [13].

Il existe plusieurs types de MCP, tels que les paraffines, les sels eutectiques, les hydrates métalliques, les polymères à changement de phase, etc. Chaque type de MCP a ses propres avantages et inconvénients, et le choix du MCP dépendra de l'application spécifique pour laquelle il est utilisé.

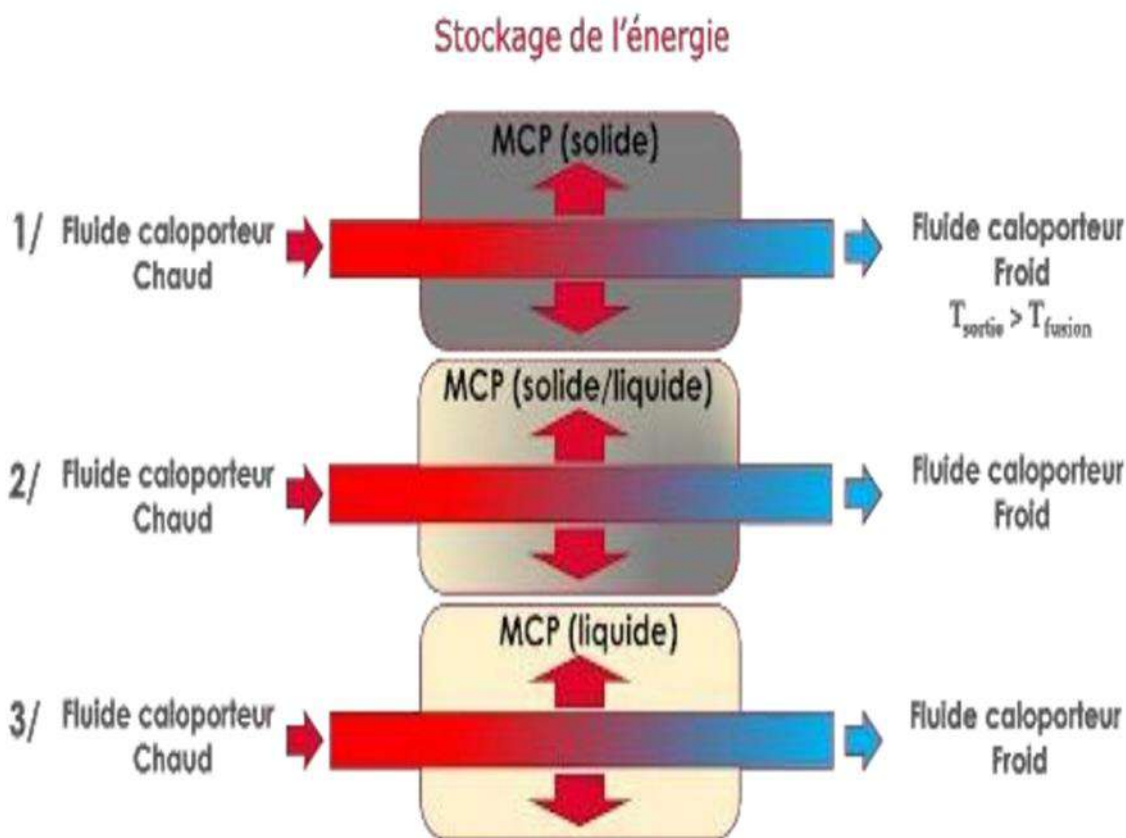


Figure II.6. Décharge de l'énergie [24].

II.4.1. Choix d'un matériau à changement de phase

La sélection d'un MCP se fait principalement en fonction de sa température de fusion, chaleur latente et aussi les propriétés suivantes [25].

+ Les propriétés thermiques :

1. Une plage ou une température de changement de phase adaptée.
2. La chaleur latente volumique doit être la plus grande possible.
3. La conductivité thermique doit être suffisante pour assurer les transferts de chaleur dans le matériau.

+ Les propriétés physiques :

1. Une grande densité.

+ Les propriétés cinétiques :

1. Pas d'effet de surfusion.
2. Un taux de cristallisation suffisant.

+ Les propriétés chimiques :

1. Une stabilité chimique à long terme
2. Pas de toxicité.
3. Une résistance au feu suffisante pour les normes en vigueur dans la construction

+ Autres propriétés :

Le MCP peut présenter des caractéristiques thermo physiques et chimiques idéales, il doit aussi présenter des caractéristiques économiques intéressantes pour rivaliser avec le stockage sensible dans l'industrie. Les caractéristiques économiques idéales sont les suivantes : [26]

1. Le coût du MCP est faible.
2. Il est disponible et abondant.
3. Son coût de fabrication est moindre et n'impacte pas l'environnement.
Idéalement, le MCP provient d'un procédé bio-sourcé et est un coproduit d'une unité de production encore non valorisé.

La figure II. 7 montre une classification des grandes familles de MCP suivant leur chaleur latente et leur température de fusion [27].

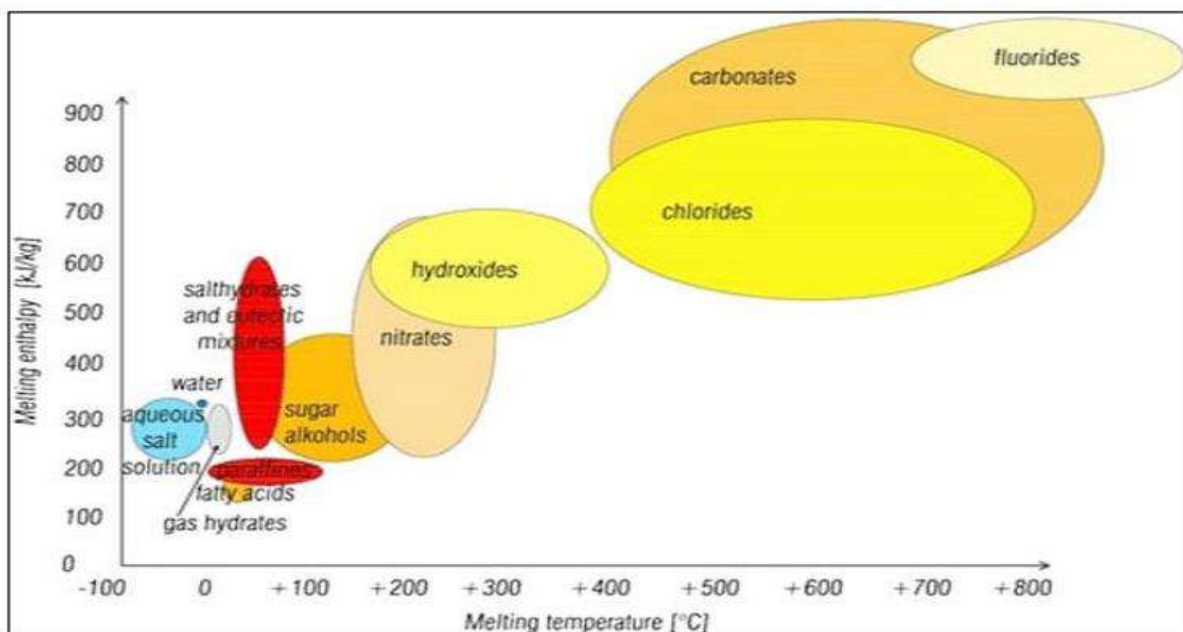


Figure II. 7. Chaleur latente en fonction de la température de fusion des grandes familles des MCP [27].

II.4.2. Types de matériaux à changement de phase (MCP)

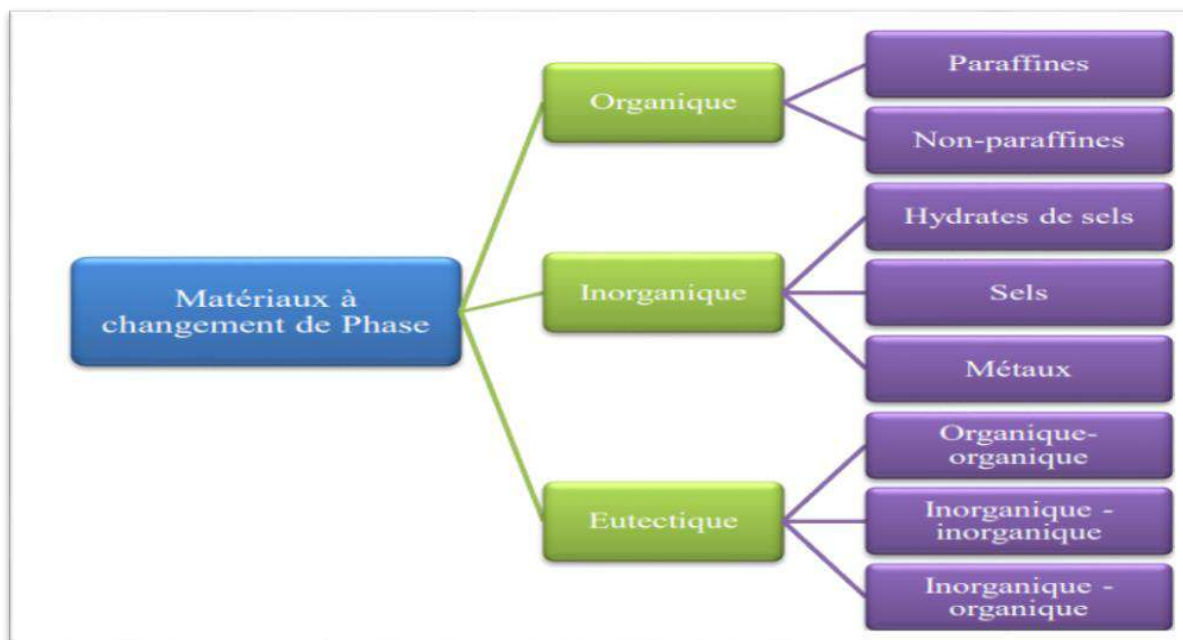


Figure II.8. Classification des MCP [28].

II.4.2.1. Matériaux organiques à changement de phase (MOCP)

Effectivement, les matériaux à changement de phase organiques peuvent être classés en deux catégories : les paraffines et les non-paraffines. Les paraffines sont des hydrocarbures linéaires qui ont une chaîne de carbone droite. Les non-paraffines sont des matériaux organiques qui contiennent des groupes fonctionnels autres que les hydrocarbures linéaires, tels que les acides gras, les esters, les alcools, les acides aminés, les sucres, etc [24].

II.4.2.2. Matériaux inorganiques de changement de phase (MICP)

Les matériaux inorganiques de changement de phase (MICP) sont des matériaux inorganiques qui ont la capacité de stocker et de libérer de grandes quantités d'énergie thermique lorsqu'ils subissent un changement d'état physique, comme la fusion ou la solidification. Les MICP sont utilisés comme matériaux de stockage de chaleur à changement de phase dans une variété d'applications, telles que la climatisation, le chauffage, la réfrigération et les systèmes de récupération de chaleur.

Les MICP peuvent être fabriqués à partir d'une variété de matériaux inorganiques, tels que les sels hydratés, les métaux et les alliages métalliques. Les sels hydratés, tels que le sulfate de sodium déca hydraté et le chlorure de calcium hexa hydraté, sont les MICP les plus couramment utilisés car ils ont des températures de fusion relativement basses, des chaleurs latentes de fusion élevées et des propriétés de stockage de chaleur stables [24].

II.4.2.3. Matériaux eutectiques

Les MCP eutectiques sont des mélanges de deux ou plusieurs substances qui se comportent comme un corps pur, c'est à dire que leur température de changement d'état est unique. En général, les eutectiques sont des mélanges de MCP organiques et inorganiques.

Les eutectiques fondent et gèlent presque toujours sans ségrégation car ils gèlent en un mélange intime de cristaux, laissant peu de possibilités de séparation des composants.

Lors de la fusion, les deux composants se liquéfient simultanément, la séparation étant à nouveau peu probable [13].

II.4.3. Les avantages et inconvénients des différents types de MCP

| | Avantages | Inconvénients |
|--------------------|--|--|
| Organique | <ul style="list-style-type: none"> • La surfusion est négligeable. • Systèmes de stockage de Chaleur. • Pas de ségrégation de phase. • Bonne stabilité dans le temps. • Facilité d'utilisation. • Sobriété écologiques. • Peu sensible au cycle de Fusion et solidification. non corrosif. | <ul style="list-style-type: none"> • Faible conductivité thermique (0.18-0.25 w/m.k). • Dilatation volumique élevée. • Inflammables. • Chaleur spécifique massique faible. • Masse volumique plus faible (0,7 à 1,2 kg/m3). • Chaleur latente peu élevée (150 à 180 kJ/m3) |
| Inorganique | <ul style="list-style-type: none"> • Disponibilité. • Grande chaleur de fusion. • Meilleure conductivité thermique (0,5 à 0,7 W/m. K • Faible dilatation volumique. • Bon marché. • Ininflammable. • Non corrosif • Matériau nature • Prix plus faible • Chaleur latente élevée (250 à 400 kJ/m3). • Chaleur spécifique massique plus élevée. • Masse plus élevée (1 à 2 g/m3) | <ul style="list-style-type: none"> • Phénomène de surfusion (15 à 30 K). • La corrosivité. -Perte d'efficacité liée aux fusions / Solidification • Déshydrations liée aux cycles thermiques • Corrosif, • Vieillessement rapide, • Chaleur latente peu élevée (150 à 1 • Faible conductivité thermique (0,15 W/m. K), 80 kJ/m3), • Masse volumique plus faible (0,7 à 1 kg/m3), Chaleur massique • Spécifique faible, Prix plus élevé que celui des paraffines et des sels hydratés |

Tableau II.3. Avantages et inconvénients des différents types de MCP [13].

II.5. Stockage de chaleur dans des réservoirs d'eau

Le stockage en réservoir est une méthode de stockage de chaleur qui consiste à injecter de l'eau chaude dans un grand réservoir isolé, qui peut être situé en surface ou enterré. L'eau chaude est stockée dans le réservoir, où elle reste jusqu'à ce qu'elle soit nécessaire. Lorsqu'elle est requise, l'eau chaude peut être récupérée et utilisée pour fournir de la chaleur à un système de chauffage ou pour produire de l'électricité [29].



Figure II.9. Stockage de chaleur dans des réservoirs d'eau.

II.5.1. Les avantages et les inconvénients

- **Les avantages :**
 - ✚ Efficacité.
 - ✚ Pertes thermiques minimales.
 - ✚ Bonne densité énergétique.
- **Les inconvénients :**
 - ✚ Coût élevé d'installation.
 - ✚ Risque technologique éventuel lié à la pression du réservoir [29].

II.6. Stockage de la chaleur de gravier

Le stockage thermique à lit de galets est une technique courante de stockage de chaleur pour les serres. Cette technique consiste à stocker l'énergie thermique pendant la journée en chauffant les galets à l'aide de panneaux solaires, de capteurs solaires thermiques ou d'autres

sources de chaleur, et à utiliser cette énergie pendant la nuit pour maintenir une température constante à l'intérieur de la serre.

Les galets sont considérés comme un moyen de stockage à faible coût et de longue durée de vie, car ils ont une conductivité thermique supérieure à celle de l'eau et des matériaux à changement de phase, ce qui permet un transfert de chaleur rapide. De plus, les galets sont souvent placés sous le sol à des profondeurs variant entre 40 et 70 cm, à l'intérieur ou à l'extérieur de la serre, ce qui permet de stocker une grande quantité d'énergie thermique [30].

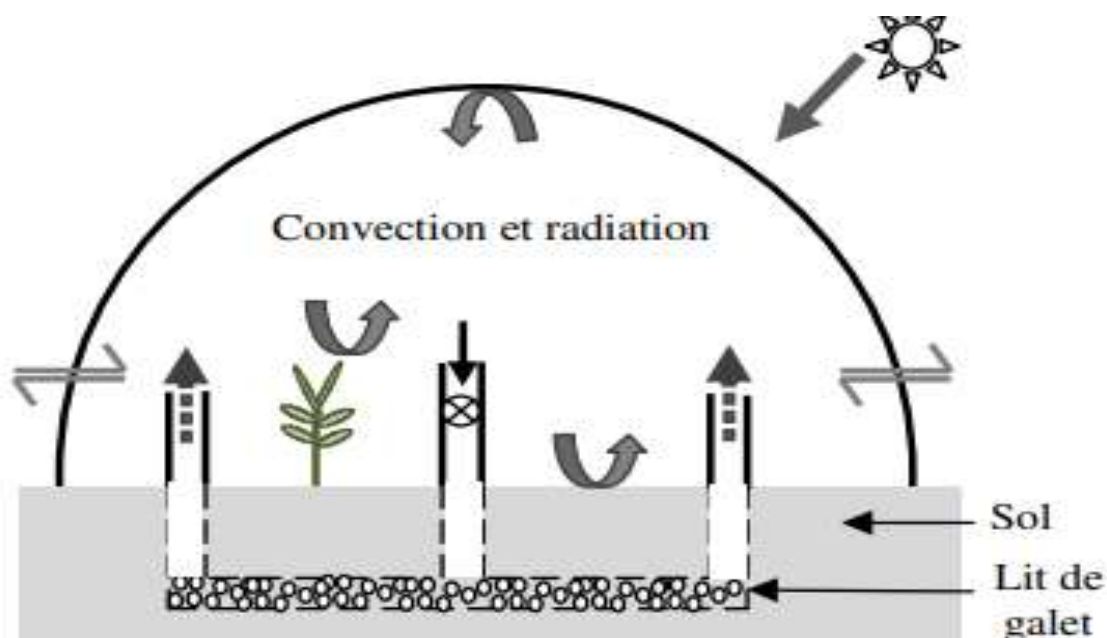


Figure II.10. Stockage dans le lit de galet à l'intérieur de la serre.

II.7. Conclusion

Les techniques de stockage de chaleur dans les serres sont des techniques importantes et efficaces pour maintenir une température appropriée pour les plantes dans les endroits aux climats froids pendant la saison hivernale. Ces techniques ont été largement utilisées dans l'agriculture pour améliorer la productivité des cultures et rendre l'agriculture durable.

Chapitre III : Résultats et discussions

III .1. Introduction

Dans ce chapitre, on a fait une simulation numérique par le logiciel ANSYS Fluent 15.0.7 Il a été développé et validé par les résultats expérimentaux tirés de l'article (Comportement climatique et activité thermique végétale d'un tunnel d'agrumes. Serre : étude numérique de la dynamique des fluides). L'étude porte sur la prédiction de l'effet d'un système de stockage de chaleur pour le chauffage d'une serre agricole en climat très froid et le suivi de l'évolution de la température lors de la fusion d'un matériau à changement de phase (MCP) (chlorure de calcium hexahydraté) $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$.

III.2 Problème physique

Le champ étudié est une serre agricole d'une largeur de 0,86 mètre, d'une longueur de 6,4 mètres et d'une hauteur de 0,3 mètre afin d'étudier la température à l'intérieur de la serre avant d'ajouter des équipements de stockage, comme le montre la Figure III.1.

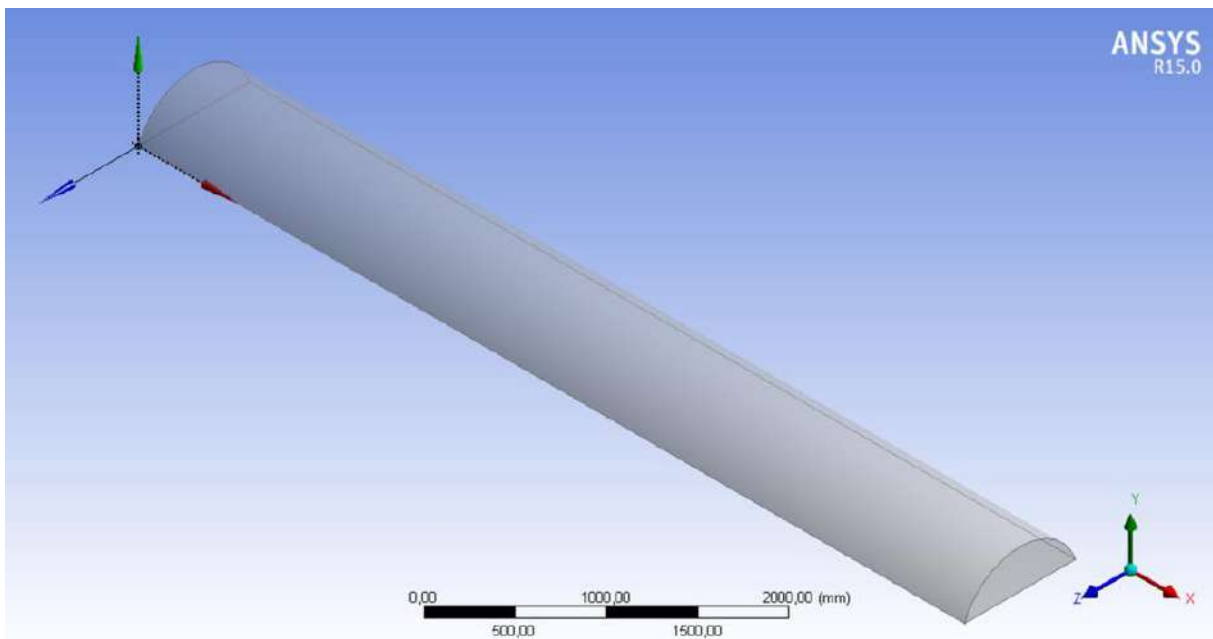


Figure III. 1. Dimensions du modèle physique étudié.

III.3. Matériau à changement de phase utilisé

Le chlorure de calcium hexahydraté est un composé chimique constitué de molécules de chlorure et de calcium attachées à six molécules d'eau. La formule chimique de ce composé est $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$. Aussi connu sous le nom de chlorure de calcium hexahydraté.

Il était principalement utilisé dans les serres pour contrôler le niveau d'humidité et fournir de la chaleur, car il stocke la chaleur et la libère progressivement, ce qui permet de maintenir une température stable adaptée à la croissance des plantes dans la serre et d'améliorer leur productivité.

| Propriétés | Symbole | Valeur |
|---|----------------|---------------|
| Température du début de la fusion [°C] | T_s | 26 |
| Température de la fin de fusion [°C] | T_L | 29 |
| Chaleur latente de fusion [J/kg] | L_f | 176000 |
| Chaleur spécifique (solide) [J/kg.K] | C_p | 2060 |
| Conductivité thermique (solide) [W/m.K] | λ | 1.09 |
| Masse volumique (solide à 24°C) [kg/m³] | ρ | 1706 |
| Viscosité dynamique [kg/m.s] | μ | 0.01 |
| Coefficient de dilatation thermique [K⁻¹] | β | 0.0005 |

Tableau III. 1. Propriétés thermo-physiques de (la chlorure de calcium hexahydraté) $CaCl_2 \cdot 6H_2O$.

III.4. Présentation de l'ANSYS

ANSYS est un logiciel de simulation multi-physique largement utilisé dans l'industrie et l'académie pour simuler des systèmes complexes et prédire leur comportement. Le logiciel ANSYS permet de résoudre des problèmes de mécanique des solides, de dynamique des fluides, d'électromagnétisme, d'analyse thermique, de mécanique des structures, d'acoustique, et de nombreuses autres applications.

Le logiciel ANSYS est utilisé dans de nombreux secteurs, tels que l'aéronautique, l'automobile, l'énergie, l'électronique, la défense, la fabrication, la santé et la recherche scientifique. Les ingénieurs et les scientifiques peuvent utiliser ANSYS pour résoudre des problèmes complexes de manière plus rapide et efficace que les méthodes traditionnelles de prototypage et de test physique.

III.4.1. Introduction sur la simulation

La simulation est définie comme la représentation d'un phénomène physique dont le comportement est décrit à l'aide de modèles mathématiques simples. En d'autres termes, les simulations peuvent représenter différents phénomènes : le transfert de matière et de chaleur dans différentes opérations unitaires grâce à des modèles thermodynamiques, et la traduction de leur comportement grâce à l'analyse d'équations analytiques.

III.5. Modèle Mathématique**III.5.1. Modèle dynamique**

Le modèle d'écoulement est basé sur les équations de Navier-Stokes régissant l'écoulement d'un fluide incompressible et instationnaire, modifiées pour tenir compte des spécificités de changement de phase. Les équations gouvernantes sont celles de la conservation de la masse et celle de quantité de mouvement :

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial x}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (\text{III.1})$$

III.5.1.1 Equation conversation de la quantité du mouvement

Suivant x :

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} = -\frac{\partial p}{\partial x} + Pr \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) + RaPr \sin \varphi \quad (\text{III.2})$$

Suivant y :

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} = -\frac{\partial p}{\partial y} + \text{Pr} \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) \quad (\text{III.3})$$

Suivant z :

$$\frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} = -\frac{\partial p}{\partial z} + \text{Pr} \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) + \text{RaPr} \cos \phi \quad (\text{III.4})$$

III.5.1.2. Equation conversation de l'énergie

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} + u \frac{\partial \theta}{\partial x} + v \frac{\partial \theta}{\partial y} + w \frac{\partial \theta}{\partial z} = k \left(\frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial z^2} \right) \quad (\text{III.5})$$

Avec : $(x,y,z) = \frac{(X,Y,Z)}{w}$, $(u,v,w) = \frac{w(u',v',w')}{k}$, $\theta = \frac{T-T_f}{T_c-T_f}$, $p = \frac{w^2}{\rho k^2} p'$, $t = t' \frac{k}{w^2}$

III.6 Condition initiale et aux limites

III.6.1. Condition initiale

Le composé de chlorure de calcium se dissout dans l'eau, environ 70 g pour 100 ml à 20 °C, sous une forme exothermique, à la suite de la formation exothermique de $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$.

III.6.2. Conditions aux limites

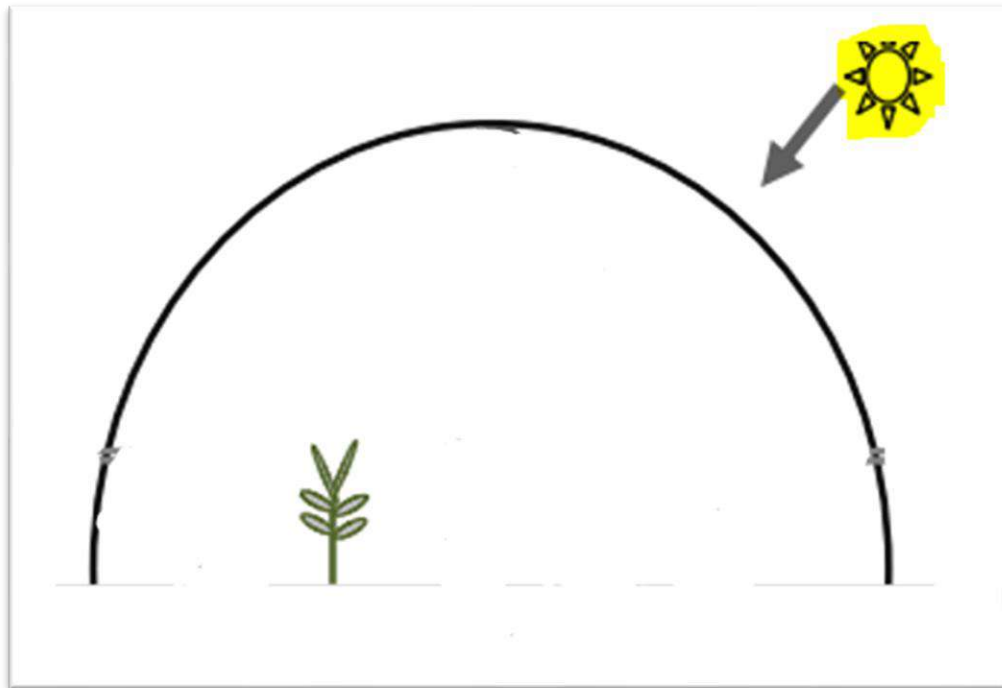


Figure III. 2. Conditions aux limites pour un système isolé

III.7. Simulation numérique

Les calculs numériques ont été effectués par le code du calcul ANSYS Fluent 15.0.7.

III.7.1. Création de la géométrie

L'acquisition géométrique est réalisée dans le logiciel (**DESIGN MODELER**).

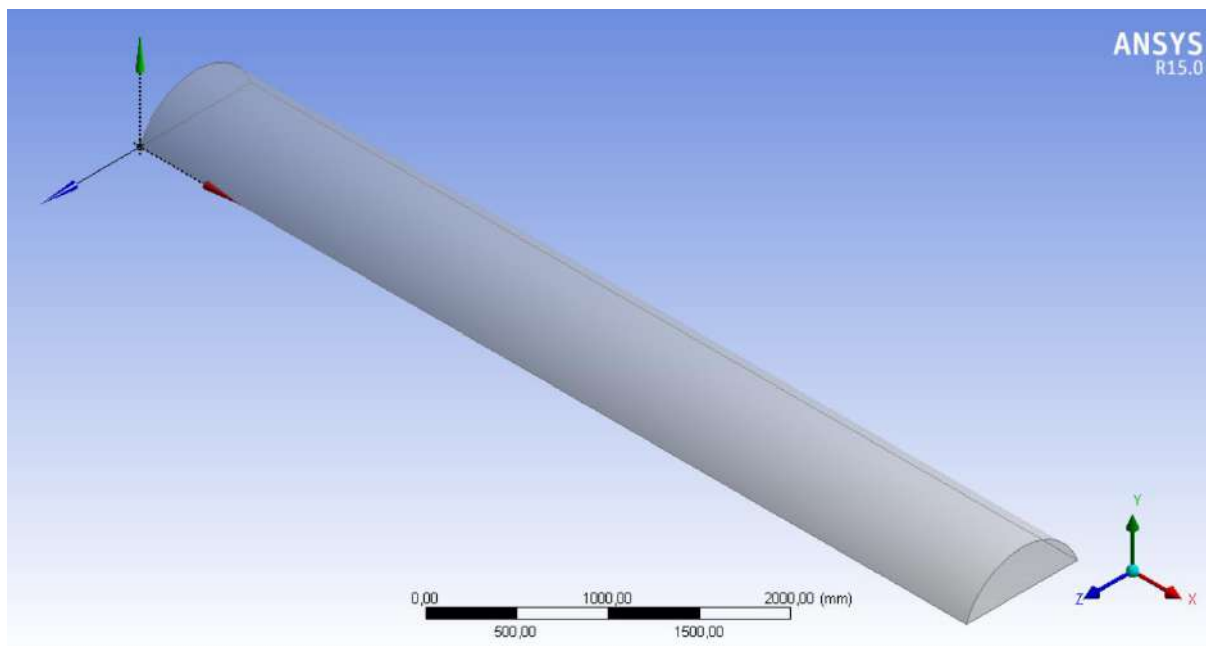


Figure III. 3. Création de la géométrie dans DESIGN MODELER

III.7.2 Maillage de la serre

La serre est maillée à l'aide du mailleur **Meshing**

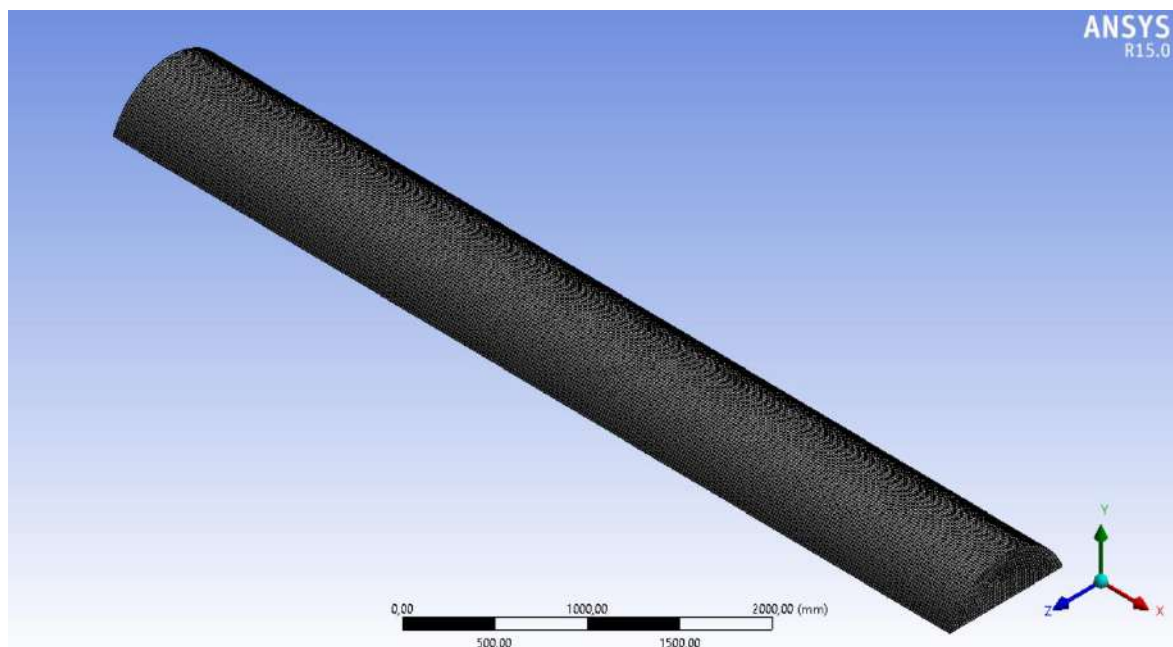


Figure III. 4. Création du maillage dans MESHING

III.7.3. Calcul numérique

Pour Les calculs numériques effectué sous FLUENT, nous avons adopté les configurations suivantes :

1. Le modèle du solveur utilisé est Pressure Based (isolée), cette formulation permet de résoudre les équations de continuité, de la conservation de la quantité de mouvement et celle de conservation de l'énergie toutes isolées les unes des autres.
2. La formulation Time : Transient ; pour l'étude instationnaire du problème physique

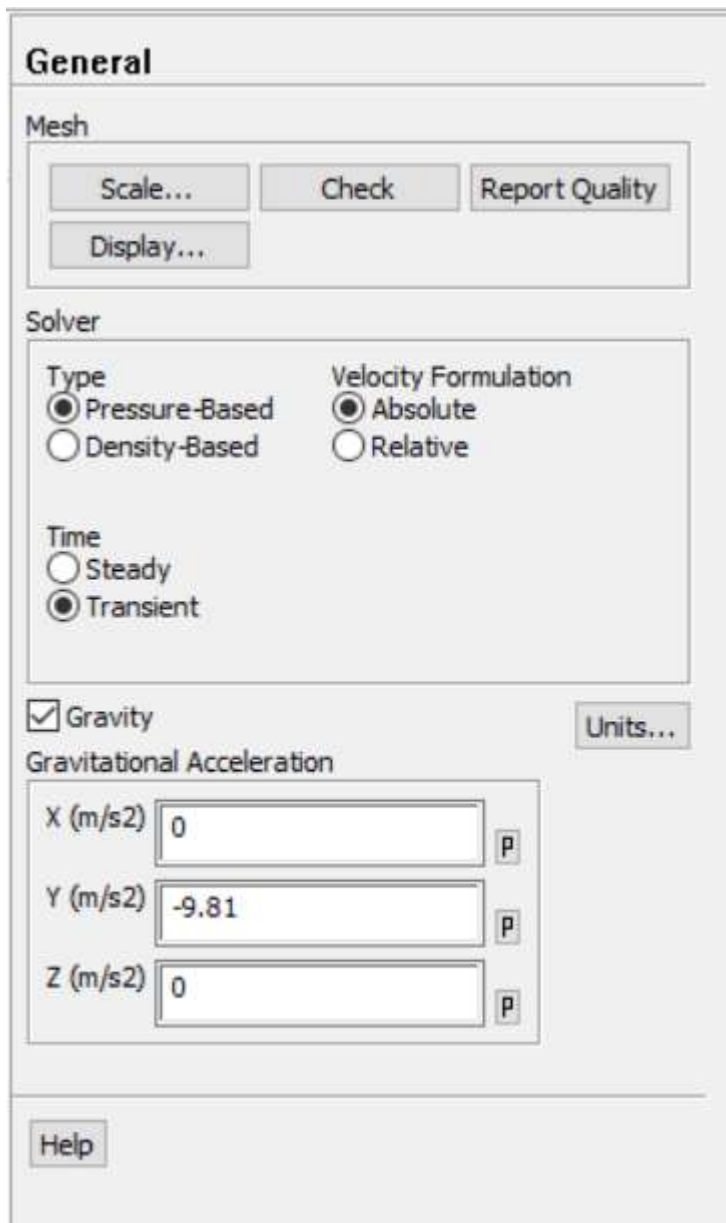


Figure III. 5. Interface de Fluent avec les paramètres du solveur utilisé

3. Pour le suivi de la fraction liquide, le modèle melting-solidification est adopté avec une constante de Darcy $C=105$.
4. Space 3D

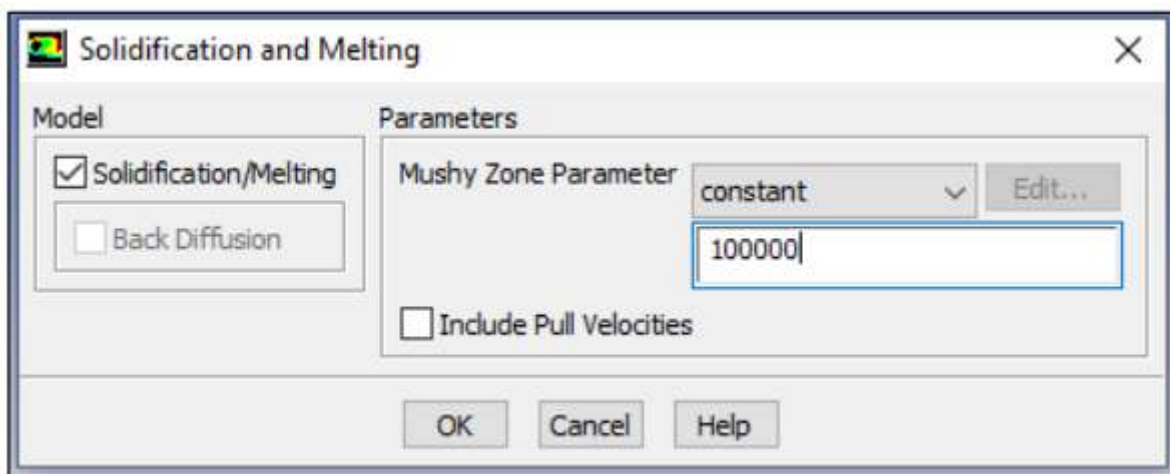


Figure III. 6. Constante de Darcy utilisée

5. Définir les paramètres de la résolution : Pour le couplage pression-vitesse dans l'équation de Navier-Stokes, Fluent propose plusieurs schémas, à savoir SIMPLE, PISO et autres. Dans cette étude, le schéma SIMPLE est adopté [31].
6. Les facteurs de sous relaxation qui semblent favoriser la convergence des résultats avec une meilleure stabilité sont données dans la figure III.7:

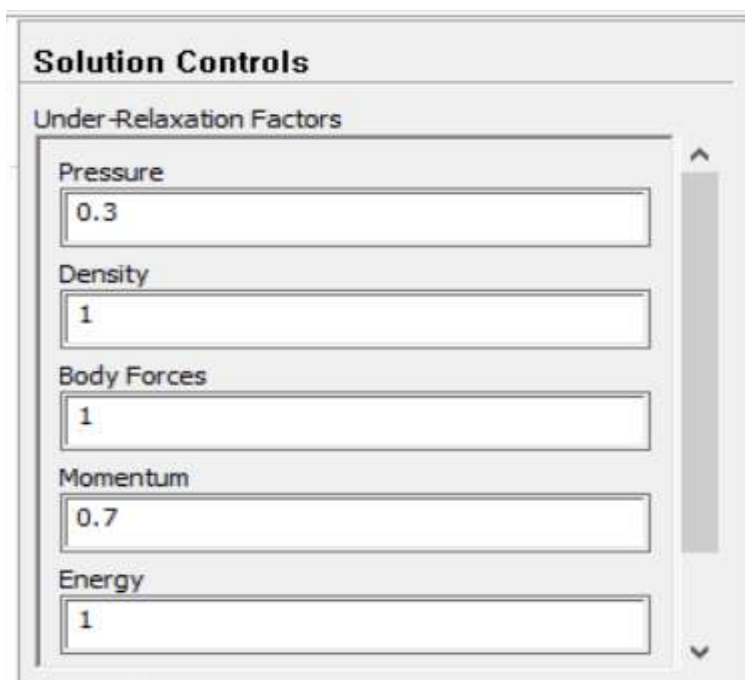


Figure III. 7. Facteurs de sous relaxation

III.8. Matériel informatique

Toutes les simulations réalisées dans la présente étude ont été élaborées par un ordinateur présentant les caractéristiques suivantes :

Processeur intel i5 2,40 GHz avec 12 Gb de RAM.

III.9. Validation expérimentale**III.9.1. Test de maillage**

Un test de maillage a été réalisé dans le but d'identifier les temps de calcul optimaux qui permettent d'obtenir la meilleure approximation, en mettant l'accent sur la convergence et la précision. Le test a consisté à évaluer cinq maillages afin de déterminer leur impact sur les performances globales du système.

| Nombre des éléments |
|----------------------------|
| 8640 |
| 11760 |
| 48278 |
| 161728 |
| 363132 |

Tableau III.2. Maillages testés

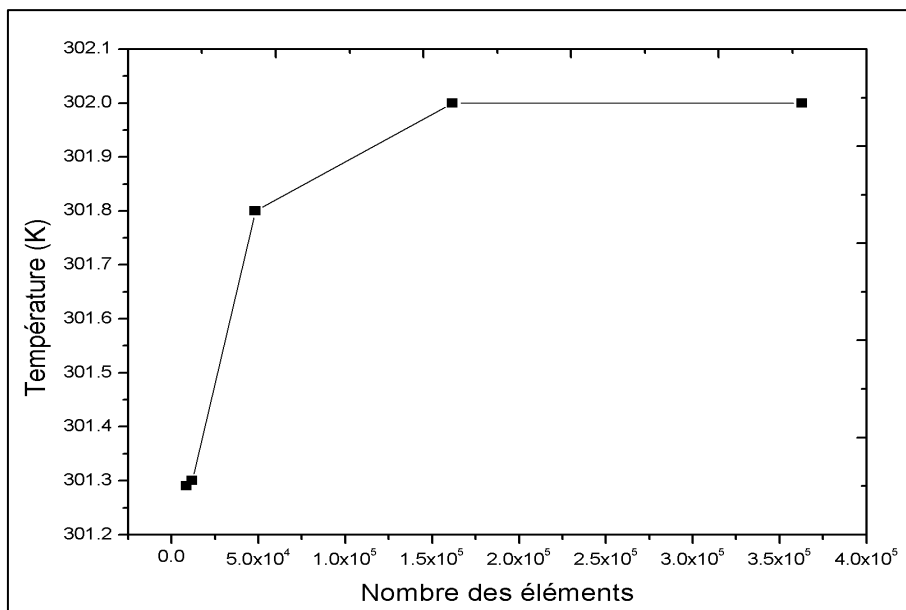


Figure III.8. Variation de la température moyenne à l'intérieur de la serre pour différents éléments de maillage

La figure III.8 montre la variation de la température à l'intérieur de la serre pour les cinq maillages testés, par rapport à le maillage le plus fine de 363132 éléments. Une erreur très faible est observée avec le maillage de 161728 éléments. Ainsi, pour mieux prédire le comportement thermique avec moins de temps de calcul, le maillage de 161728 éléments est choisi.

III.10. Résultats et discussions

III.10.1. Intégration des matériaux a changement de phase

L'intégration du MCP dans la serre a été stratégiquement positionnée sur toute sa longueur afin de maximiser la distribution de l'énergie thermique. En plaçant les MCP à différents endroits de la serre, l'absorption et la libération de la chaleur peuvent être réparties plus efficacement sur l'ensemble de l'espace. Ainsi, l'augmentation de la température pendant les périodes de fort rayonnement solaire est uniformément répartie, ce qui permet d'éviter les points chauds localisés et de favoriser un environnement thermique plus uniforme. De même, pendant les périodes de faible rayonnement, le MCP déchargé diffuse la chaleur stockée dans l'ensemble de la serre. L'emplacement stratégique du MCP dans la serre optimise la distribution de l'énergie thermique, ce qui permet d'obtenir un climat plus équilibré et mieux adapté à la culture des plantes. Comme le montre la figure III.9.

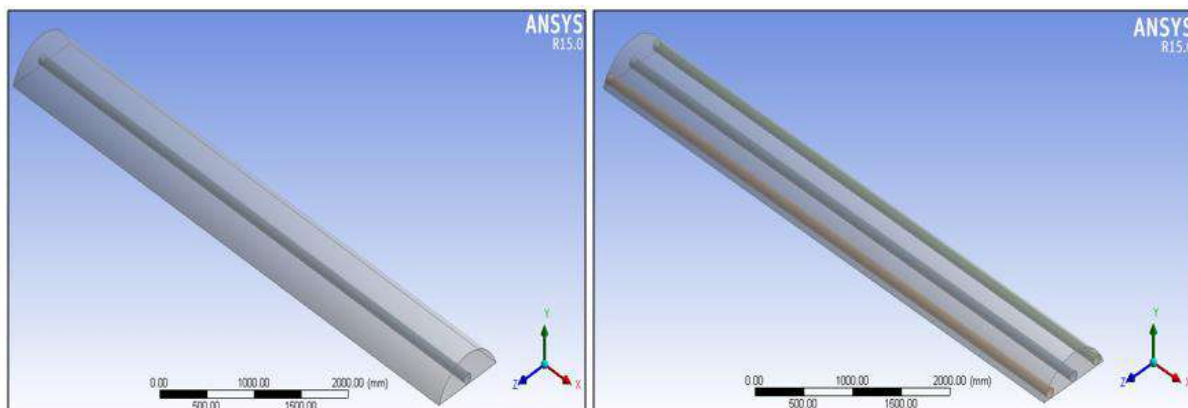


Figure III.9. Placement du MCP à l'intérieur de la serre

III.10.2. Distribution de la température dans la serre

La distribution de la température à l'intérieur de la serre est présentée pour différentes configurations (sans MCP et avec différentes masses de MCP) en utilisant des sections coupées pour mieux observer le changement comme le montre la figure III.10.

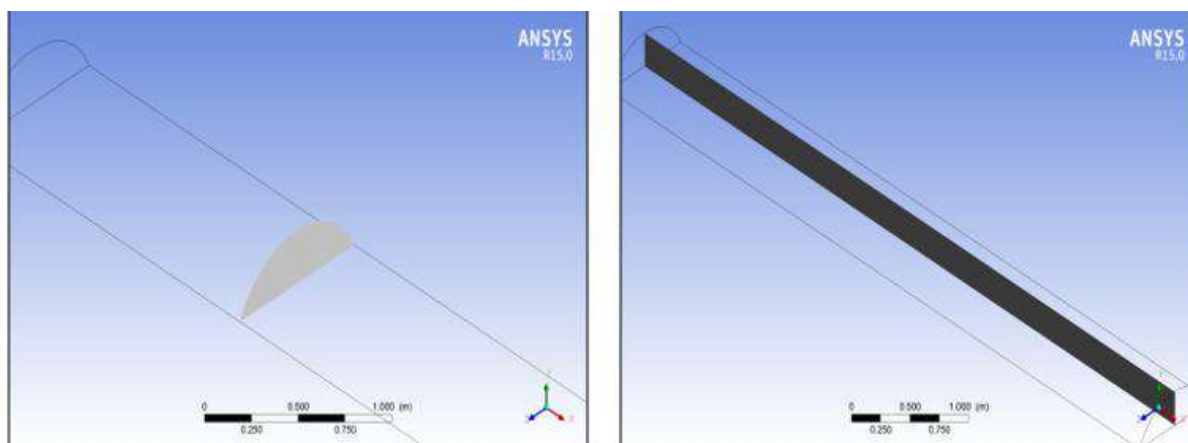


Figure III.10. Coupes transversales pour le tracé des contours

III.10.2.1. Distribution de la température dans la serre sans MCP

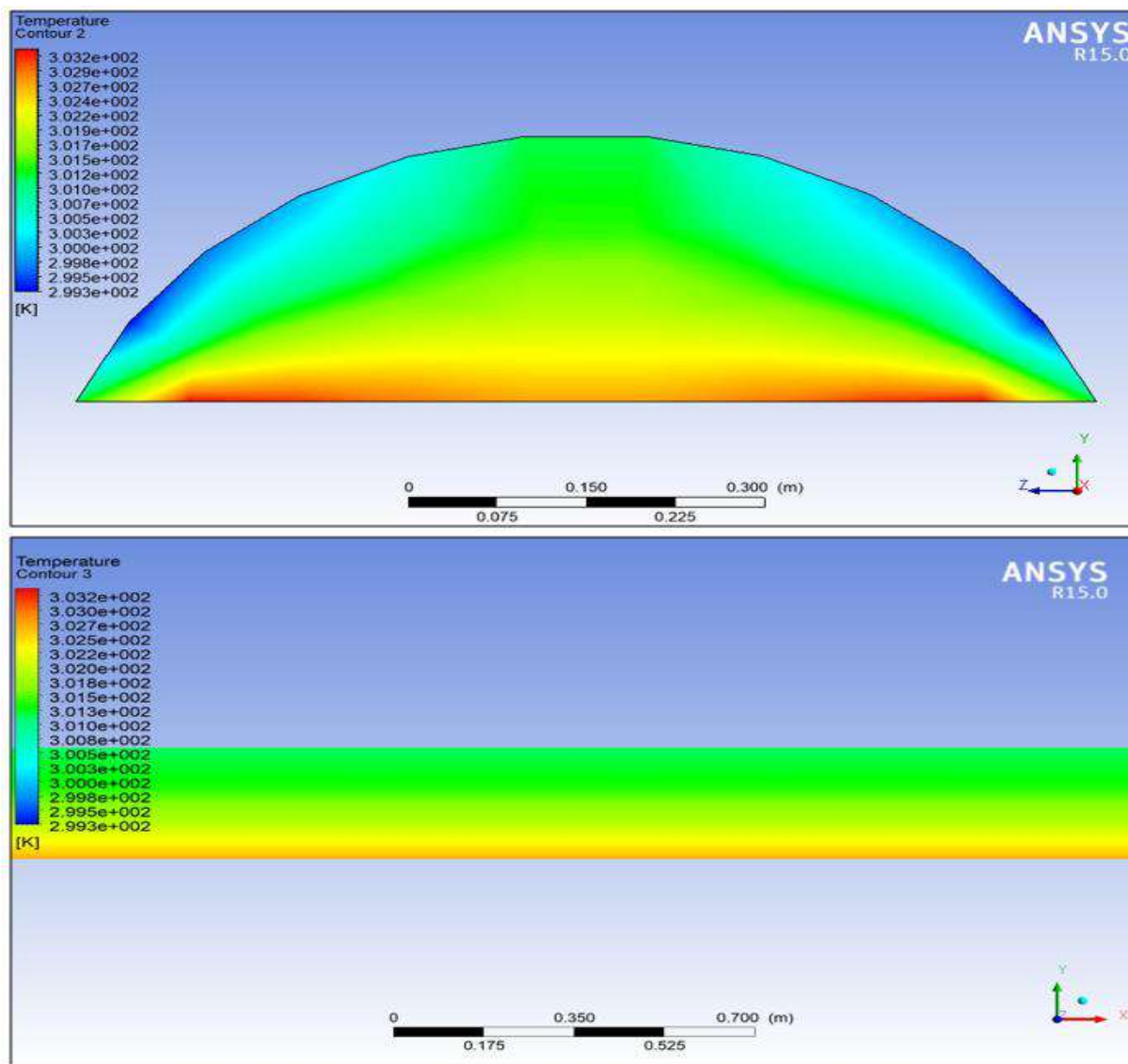


Figure III.11. Distribution de la température dans la serre (sans MCP)

La figure III.11 montre la distribution de la température dans la serre pour les deux coupes transversales. Le rayonnement solaire fournit de l'énergie à la serre, chauffant l'air et les objets à l'intérieur. Lorsque le rayonnement pénètre par le toit ou les parois du tunnel, il réchauffe d'abord l'air et les surfaces situées en dessous, atteignant un maximum de 303.2 K dans des conditions normales. L'air chaud a tendance à s'élever, créant un courant de convection naturel à l'intérieur du tunnel. Ce mouvement d'air chaud aide à répartir la chaleur dans toute la serre.

III.10.2.2. Distribution de la température dans la serre avec MCP (Configuration 1)

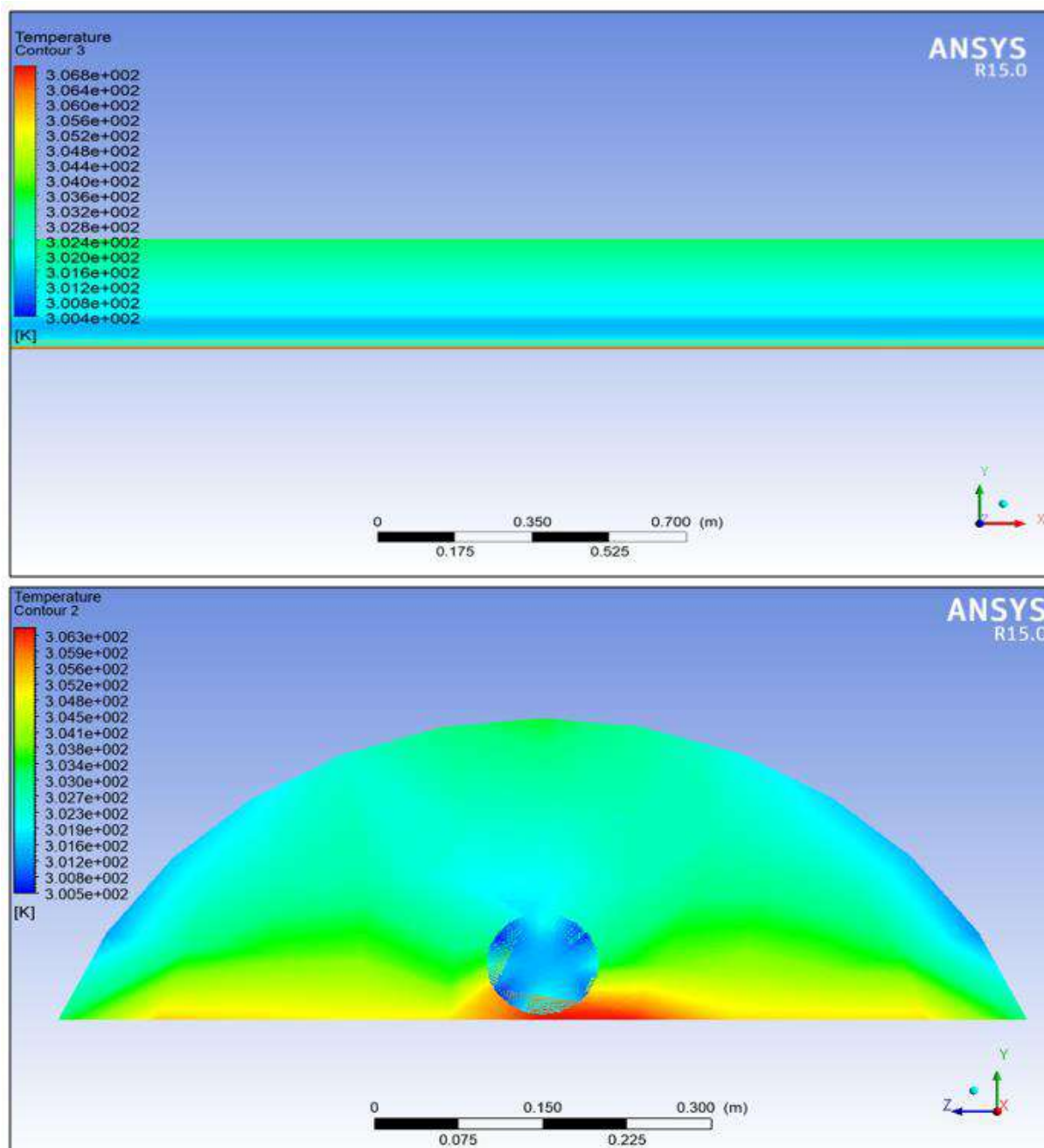


Figure III.12. Distribution de la température dans la serre avec MCP (Configuration 1)

La figure III.12 montre la distribution de température dans la serre des deux coupes avec MCP inclus, avec incorporation de MCP (à 100 % de liquide) et pendant un faible rayonnement, étant placés dans des tubes de diamètre 100 mm et de longueur 6,4 m et avec une quantité de 50 mm³ de MCP dans le tube et lors du rayonnement Plus la température à l'intérieur de la serre tunnel augmente, ce qui est dû au rejet du procédé MCP entraînant une augmentation du gain d'énergie à l'intérieur de la serre.

III.10.2.3. Distribution de la température dans la serre avec MCP (Configuration 3)

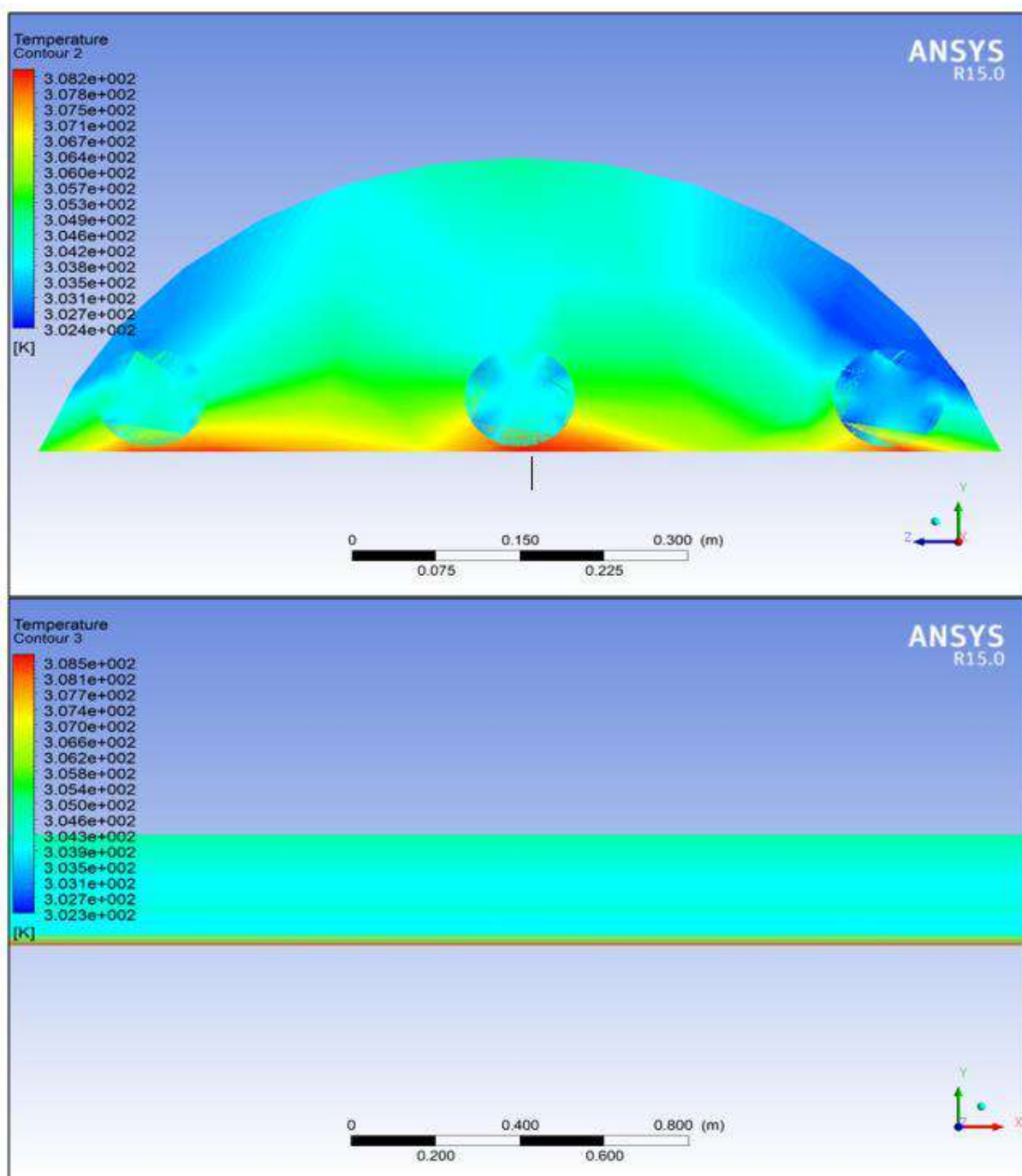


Figure III.13. Distribution de la température dans la serre avec MCP (Configuration 3)

En outre, en incorporant plus de MCP lorsque le rayonnement est faible, la température à l'intérieur du tunnel de la serre augmente plus, ce qui est dû à l'augmentation de la masse ajoutée à l'intérieur du système qui conduit à plus d'énergie comme le montre la figure III.13.

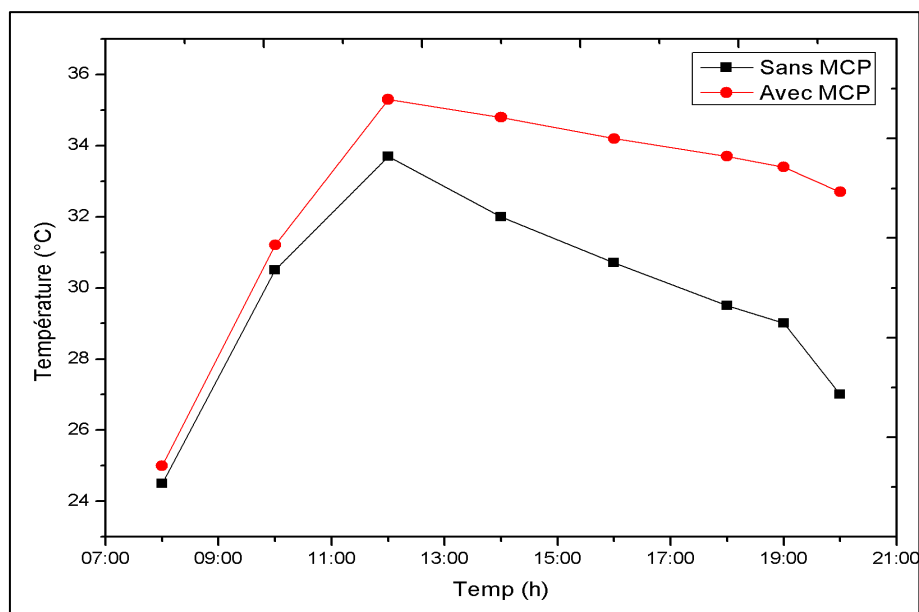


Figure III.14. Variation horaire de la température à l'intérieur de la serre avec et sans MCP

La figure III.14 montre la variation horaire de la température à l'intérieur de la serre avec et sans MCP. Initialement, en l'absence de MCP, la température à l'intérieur de la serre suit le schéma du rayonnement solaire, avec une diminution pendant les périodes de faible rayonnement. Cependant, lorsque le MCP est incorporé, le processus de décharge se produit. Pendant les périodes de fort rayonnement solaire, le MCP absorbe et stocke la chaleur excédentaire, empêchant ainsi une augmentation rapide de la température à l'intérieur de la serre. Lorsque le rayonnement solaire diminue ou disparaît, le MCP déchargé libère progressivement la chaleur stockée, contribuant ainsi au maintien d'une température plus élevée à l'intérieur de la serre. Ce processus de décharge permet à la serre de conserver et de redistribuer l'énergie thermique, ce qui se traduit par une période prolongée de températures élevées, même en cas de faible rayonnement, ce qui est bénéfique pour la croissance et le développement des plantes.

III.11. Conclusion

L'objectif principal de ce travail est d'estimer la température à l'intérieur de la serre en utilisant le MCP ($\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) pour améliorer les performances thermiques de la serre pendant les périodes froides et hivernales en développant la conception thermique des serres.

Conclusion générale

L'objectif principal de ce travail est de modifier le climat à l'intérieur des serres pendant les nuits froides d'hiver et de connaître la répartition de la chaleur lors du changement de phase (chlorure de calcium hexahydraté) dans les serres.

Les simulations ont été développées par le logiciel ANSYS Fluent 15.0.7 et validées par les résultats expérimentaux obtenus.

Cette étude porte sur l'exploitation d'un des matériaux à changement de phase, le chlorure de calcium hexahydraté, pour chauffer la serre et augmenter sa production agricole et améliorer sa qualité.

Le programme est capable de faire fonctionner toutes les parties de la serre et de la chauffer à partir de chaque partie. Il est également capable de fournir l'air à l'intérieur de la serre via le mode MCP avec température et vitesse et donne les résultats affichés par le programme qui représentent les changements de température dans chaque partie de la serre. La circulation uniforme de l'air à l'intérieur de la serre provoque le réchauffement des molécules d'air à la surface de la terre.

Ainsi, cette étude peut être conservée car il est possible d'améliorer les performances thermiques des serres en ajoutant des modifications telles que des systèmes de chauffage, la généralisation des systèmes de stockage de chaleur ou de nouvelles configurations techniques.

ملخص

يدور موضوع هذه الدراسة حول أهمية البيوت البلاستيكية والدور المهم الذي تلعبه في الزراعة الحديثة، والبحث عن تقنية تخزين الحرارة لتدفئة صوبة زراعية. تم الحصول على هذه النتائج باستخدام برنامج Fluent ANSYS 15.0.7 مع إدخال مواد تغيير الطور ($\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) لرفع درجة الحرارة وتسخين الصوبة الزراعية وأظهرت النتائج التي قدمها البرنامج أنها فعالة ومرضية في تحسين أداء الصوبات الزراعية.

الكلمات المفتاحية: مواد تغيير الطور (PCM)، ANSYS Fluent، انصهار، محاكاة رقمية.

Abstract

The subject of this study revolves around the importance of greenhouses and the important role they play in modern agriculture, and the search for heat storage technology to heat an agricultural greenhouse. These results are obtained using the parameters of the program Fluent ANSYS 15.0.7 with the incorporation of phase change materials ($\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) to raise the temperature and heat the agricultural greenhouse. The results provided by the program showed that it is effective and satisfactory in improving the performance of agricultural greenhouses.

Keyword: Phase change materials (PCM), ANSYS Fluent, Melting, Numerical simulation.

Résumé

Le sujet de cette étude tourne autour de l'importance des serres et du rôle important qu'elles jouent dans l'agriculture moderne, et sur la recherche d'une technologie de stockage de chaleur pour chauffer une serre agricole. Ces résultats sont obtenus en utilisant les paramètres du programme Fluent ANSYS 15.0.7 avec l'incorporation de matériaux à changement de phase ($\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) pour élever la température et chauffer la serre agricole. Les résultats fournis par le programme ont montré qu'il est efficace et satisfaisant dans l'amélioration des performances des serres agricoles.

Mots-clés : Matériaux à changement de phase (MCP), ANSYS Fluent, Fusion, Simulation numérique

Références

- [1] DIDI Faouzi « Optimisation de la gestion du microclimat de la serre par l'introduction de l'intelligence artificielle » thèse de doctorat, Université Abou Bakr Belkaid– Tlemcen ,2018.
- [2] L. Zhang, P. Xu, J. Mao, X. Tang, Z. Li, et J. Shi « A low cost seasonal solar soil heat storage system for greenhouse heating: Design and pilot study » *Appl. Energy*, vol. 156, p. 213-222, Oct. 2015.
- [3] DLIM Massinissa « Simulation numérique de l'ambiance interne d'une serre de culture sous un climat chaud et sec ». Mémoire de master, option : Energétique, université mouloud mammeri tizi-ouzou.2018.
- [4] M. Tedjini et D. Dihia « Réalisation d'une serre agricole intelligente et contrôlable à distance par Internet » Mémoire de master : ingénierie des systèmes, Université Abou Bakr Belkaid– Tlemcen .2018
- [5] DHIKEL abdelkader, HADJADJ abdelghani « Proposition d'une technique de chauffage des serres agricoles » Mémoire de master : Energétique, Université KASDI Merbah d'Ouargla. 2022
- [6] KHERBOUCHE Abdallah « Analyse de comportement thermique des parois transparente à faible 'inertie thermique application aux serre agricole » Mémoire de master : Physique, Université Aboubakr Belkaïd – Tlemcen 2019.
- [7] K. Mesmoudi « Présentée et soutenue publiquement » Mémoire de Doctorat : ENERGETIQUE, UNIVERSITE HADJ LAKHDAR BATNA 2012.
- [8] LEBBAL CHIRINE « Etude de la convection sous serres fermées et ouvertes en présence de la plante » thèse de MAGISTERE En Physique Option : Physique Energétique, Université El-Hadj Lakhdar – Batna. (2008).
- [9] Loukal nassima, kebir ouiza « Comparaison du champ thermique dans deux types de serre de culture » Mémoire de master : ENERGETIQUE, Université Mouloud MAMMERI de Tizi-Ouzou 2018.
- [10] BAKHTI Issam Eddine, TOUILEB Soheib « Modélisation et modification d'une serre agricole avec recyclage d'eau et production d'énergie adapté à la zone saharienne » Mémoire de master : Physique, Université Aboubakr Belkaïd – Tlemcen 2020.

- [11] DJALAB Hamida, GHADRI El hadj « CHAUFFAGE DE SERRE PAR ENERGIE GEOTHERMIQUE » Mémoire de master : Energétique, Mohamed Boudiaf University of M'sila 2020.
- [12] LAGHZAOUI Amine, PEERHOSSAINI Donia « STOCKAGE DE CHALEUR : ENERGIE SOLAIRE ET AUTRES APPLICATIONS » ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE 2010.
- [13] K. M. Abdelbassit « Simulation numérique et validation de la fusion de la paraffine dans une cavité chauffée par le bas » Mémoire de master : Energétique, Université Aboubakr Belkaïd – Tlemcen 2021.
- [14] I. Dincer, M. Akif Ezan « Heat Storage a Unique Solution for Energy Systems » Vol. 1, p. 57, 2018.
- [15] N. Maahfoudi « Stockage de la chaleur dans un milieu granuleux solide » Mémoire de Doctorat : Energétique, Université Mohamed Khider Biskra, 2016.
- [16] S. Kalaiselvam, R. Parameshwaran « Thermal Energy Storage Technologies for Sustainability Systems Design, Assessment and Applications» Vol. 1, p. 65, 2014.
- [19] A.M. Vaz Sá « Sustentabilidade na construção : comportamento térmico de edifícios em Portugal usando materiais de mudança de fase » Ph.D. Thesis, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto—FEUP, 2013.
- [17] I. Marouf, S. Belkadi « Etude expérimentale et numérique de la fusion de paraffine dans une cavité chauffée par le bas » Mémoire de Master : Energétique, Université Abou Bekr Belkaid Tlemcen, 2020.
- [18] S. Kalaiselvam, R. Parameshwaran « Thermal Energy Storage Technologies for Sustainability Systems Design, Assessment and Applications» Vol. 1, pp. 65-66, 2014.
- [20] J.M.P.Q. Delgado, J.C. Martinho, A. Vaz Sá, A.S. Guimarães, V. Abrantes «Thermal Energy Storage with Phase Change Materials A Literature Review of Applications for Buildings Materials» Vol. 8, p. 6, 2019.
- [21] A. Shukla, A. Sharma, P.H. Biwolé « Latent Heat-Based Thermal Energy Storage

Systems Materials, Applications, and the Energy Market» Vol. 1, p. 7, 2020.

[22] S. Kalaiselvam, R. Parameshwaran « Thermal Energy Storage Technologies for Sustainability Systems Design, Assessment and Applications» Vol. 1, pp. 61-62, 2014.

[23] S. Kalaiselvam, R. Parameshwaran « Thermal Energy Storage Technologies for Sustainability Systems Design, Assessment and Applications» Vol. 1, p. 127, 2014.

[24] D. Verdier-Gorcias « Stockage thermique de protection à chaleur latente intégré à un Récepteur solaire à air pressurisé » Mémoire de Doctorat : Energétique et Génie des Procédés, Université de Perpignan, 2016.

[25] J. Borderon « Intégration des matériaux à changement de phase comme système de régulation dynamique en rénovation thermique » Mémoire de Doctorat : Génie Civil, Université de Lyon, 2012.

[26] A. Soupart-Caron, « Stockage de chaleur dans les matériaux à changement de phase » Mémoire de Doctorat : énergétique et procédés Université Grenoble Alpes, 2016.

[27] D. Verdier-Gorcias « Stockage thermique de protection à chaleur latente intégré à un récepteur solaire à air pressurisé » Mémoire de Doctorat : Energétique et Génie des Procédés, Université de Perpignan, 2016.

[28] A. Soupart-Caron « Stockage de chaleur dans les matériaux à changement de phase » : Mécanique des fluides, énergétique et procédés 2015.

[29] Matthieu Martinelli « Stockage d'énergie thermique par changement de phase Application aux réseaux de chaleur », Université Grenoble Alpes, 2016.

[30] S. Bezari, D. Lalmi, et A. Babou « Chauffage des Serres avec Stockage Thermique : étude & investigation » Unité de Recherche Appliquée en Energies Renouvelables, URAER, Ghardaïa, Algeria 2017.

[31] B. Kamkari, H.J. Amlashi « Numerical simulation and experimental verification of constrained melting of phase change material in inclined rectangular enclosures, International Communications in Heat and Mass Transfer» Vol. 88, pp. 211-219, 2017.

