

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة أبي بكر بلقايد - تلمسان

Université Aboubakr Belkaïd – Tlemcen –

Faculté de TECHNOLOGIE



MEMOIRE

Présenté pour l'obtention du **diplôme de MASTER**

En : Génie Mécanique

Spécialité : Energies Renouvelables en Mécanique

Par : ZAHZEH Rym Fatima Zohra

Sujet

**Etude numérique de performance d'un système de stockage thermique pour
une mini centrale solaire à concentration**

Soutenu publiquement, le 12 / 06 / 2024, devant le jury composé de :

M. BENRAMDANE M.
M. ALIANE A.
M. SARI HASSOUN Z.
M. BOUHALLASSA A.

MCA Université de Tlemcen
MCB Université de Tlemcen
MCA Université de Tlemcen
Doctorant CDER - Alger

Président
Examineur
Encadreur
Co-Encadreur

Année universitaire : 2023 /202

Remerciements

La meilleure façon de commencer est de commencer, et c'est ce que j'ai fait après une longue réflexion sur ce que je vais écrire que ce soit dans mes remerciements ou dans mes dédicaces.

La rédaction des remerciements n'est pas un exercice aisé mais pourtant indispensable afin de remercier toute personne ayant contribué de près ou de loin à ce travail de projet de fin d'étude, même si toutes ces personnes méritent bien plus que ça.

En premier lieu je remercie dieu tout puissant de m'avoir donné du courage pour réussir à achever ce mémoire.

Ensuite je voudrai remercier chaque membre de ma famille qui a été présent à mes côtés.

Je voudrai aussi remercier le centre des énergies renouvelables de m'avoir permis de faire mon stage chez eux et en particulier un spécial remerciement à l'équipe de division thermique Housseyn, Sabrina, Mohammed et Zaki pour leurs aide, leurs gentillesse, leurs bienveillances, et pour tout ce qu'ils m'ont appris au cours de mon stage

Et surtout je voudrai adresser mes sincères remerciements au département de Génie Mécanique pour la formation LMD en énergie renouvelables et spécifiquement au meilleur chef département qui a vraiment un savoir-faire avec les étudiants Mr M.Benramdane et sa secrétaire Khadija, sans oublier la personne qui a toujours su trouvé les bons mots pour m'aider Mr H.Guellil.

Mes sincères remerciements vont aussi au centre J2E et surtout à Mr Bendahmane Bilal.

Comme on dit les meilleurs pour la fin, j'exprime ma plus grande gratitude à mes deux encadrant sans qui je ne serai pas là aujourd'hui même, je vous suis vraiment reconnaissante, Mr Z. Sari Hassoun pour son aide la plus précieuse, ses encouragements et sa générosité et Mr A. Bouhallassa d'avoir été à l'écoute et être resté à mes côtés tout au long de ces mois, pour sa confiance, sa patience, son savoir-faire et pour tout ce qu'il m'a appris.

Dédicace

*Aucune dédicace ne saurait exprimer mon respect, mon amour éternel, et ma considération à celle
qui a le paradis sous ses pieds pour ses prières et ses sacrifices.*

Ma mère chérie

*A mon exemple de force et de courage, celui qui m'as toujours mis dans le droit chemin qui a
toujours cru en moi et m'as encouragé pour atteindre mes objectifs*

Mon père chéri

L'amour de mes parents a fait de moi celle que je suis aujourd'hui

*A la meilleure amie qu'on puisse avoir dans la vie avec son oreille toujours attentive et sa bonne
humeur*

Ma petite sœur adorée Manel

A celui qui m'a toujours protégé de tout dans cette vie, l'amour fraternel est l'amitié du sang

Mon frère Mehdi

A ma 2eme sœur pour ses précieux conseils et encouragements

Ma belle-sœur Khaoula

A celle qui m'a tant aidé

Ma cousine Farah

A ma grand-mère maternelle rebi ykheliha

A la mémoire de mes grands-parents paternels et mon grand-père maternel rebi yarhamhoum

Et à toute ma famille

A la mémoire de mon meilleur ami Nassim rebi yarhmou

A mes amis qui m'ont soutenu au cours de cette épreuve difficile, ils se reconnaîtront

*Aux enseignants du département de Génie mécanique pour leur aide et leur confiance durant
mon cursus universitaire*

*A l'équipe de division thermique du centre des énergies renouvelables plus précisément Sabrina,
Housseyn, Amar, Mohammed et Zaki*

Et surtout je le dédie a moi-même, je le mérite hhhh

ملخص

يتزايد استهلاك الطاقة في جميع أنحاء العالم منذ عدة عقود ويواجه تحديات ندرة الموارد الأحفورية والمخاطر العالمية. في مواجهة هذه المشاكل، فإن تخزين الحرارة الكامنة بواسطة محطات الطاقة الشمسية المركزة باستخدام مواد تغيير الطور الصلب والسائل يمثل حلاً واعداً. يتيح لك الاستفادة الكاملة من الطاقات المتجددة ويساهم في الإدارة الحرارية لأنظمة الطاقة. تتمتع المواد المتغيرة الطور بالقدرة على تخزين وإطلاق الطاقة الحرارية عند الانتقال من مرحلة إلى أخرى. في هذه الدراسة العددية، تم تطوير مقارنة بين البارافينات المختلفة المستخدمة كمواد متغيرة الطور في حاوية تخزين أسطوانية مع طريقة الحجم المحدود، المعلمات تتقاطع مع أنابيب تحتوي على مائع نقل الحرارة بواسطة برنامج برامج المحاكاة المحددة لهذه الدراسة هي الهندسة وسائل نقل الحرارة، والمعلمات المتغيرة هي البارافينات المستخدمة كمواد متغيرة الطور، وذلك لمعرفة أي البارافين أفضل في التخزين الحراري.

الكلمات المفتاحية: التخزين، الحرارة الكامنة، مواد تغيير الطور، مائع نقل الحرارة، أنيسيس فلويينت، البارافينات.

Abstract

Energy consumption has been growing across the world for several decades and is being challenged by the scarcity of fossil resources and global risks. Faced with these problems, latent heat storage powered by concentrated solar power plants using solid-liquid phase change materials “PCM” presents a promising solution. It allows you to fully benefit from renewable energies and contributes to the thermal management of energy systems. PCMs have the capacity to store and release thermal energy when transitioning from one phase to another. In this numerical study a comparison between different paraffins used as PCM in a cylindrical storage enclosure crossed by tubes containing a heat transfer fluid was developed by the Ansys Fluent 16 software with the finite volume method, the parameters set for this study are the geometry and the HTF, and the variable parameters are the paraffins used as phase change materials, in order to discover which is the best paraffin in thermal storage.

Key words: storage, latent heat, phase change materials, heat transfer fluid, Ansys Fluent, paraffins.

Résumé

La consommation énergétique est en croissance à travers le monde depuis plusieurs décennies et se heurte à la raréfaction des ressources fossiles et aux risques planétaires. Face à ces problèmes, le stockage par chaleur latente alimenté par les centrales à concentration solaires moyennant des matériaux à changement de phase solide -liquide « MCP » présente une solution prometteuse. Il permet de bénéficier pleinement des énergies renouvelables et il contribue à la gestion thermique des systèmes énergétiques. Les MCP ont la capacité de stocker et libérer de l'énergie thermique lors du passage d'une phase à une autre. Dans cette étude numérique une comparaison entre différentes paraffines utilisées comme MCP dans une enceinte cylindrique de stockage traversée par des tubes contenant un fluide caloporteur a été développée par le logiciel Ansys Fluent 16 avec la méthode des volumes finis, les paramètres fixés pour cette étude sont la géométrie et le fluide caloporteur, et les paramètres variables sont les paraffines utilisés comme matériaux à changement de phase, afin de découvrir quelle est la meilleure paraffine en stockage thermique.

Mots clés : stockage, chaleur latente, matériaux à changement de phase, fluide caloporteur, Ansys Fluent, paraffines.

Table des matières

Remerciements	2
Résumé	8
Table des matières	9
Liste des tableaux	11
Liste des figures.....	12
Introduction générale.....	15
Chapitre I État de l’art et recherche bibliographique	18
I.1 Généralités sur les énergies renouvelables	18
I.1.1 Définition	18
I.1.2 Différents types	18
I.2 Généralités sur les systèmes de stockages :.....	31
I.2.1 Définition	31
I.2.2 Principes du stockage thermique :.....	32
I.2.3 Comparaison entre les différents principes de stockage :	35
I.2.4 Intérêt du stockage dans les centrale CSP	35
I.2.5 Concepts de stockage thermique :.....	36
I.2.6 Matériaux à changement de phase PCM	36
I.3 Recherches bibliographiques	42
Chapitre II Géométrie du modèle et formulation mathématique	43
II.1 Généralités sur le transfert de chaleur	43
II.1.1 Définition	43
II.1.2 Différents modes de transfert de chaleur :.....	43
II.2 Généralités sur les écoulements des fluides :	51
II.2.1 Définition d’un fluide :.....	51
II.2.2 Classification des écoulements des fluides :	51
II.3 Equations de base :	52
II.3.1 Equation de conservation quantité de mouvement :.....	52

II.3.2	Equation de continuité :	52
II.3.3	Equation de conservation d'énergie :	53
II.4	Géométrie du modèle :	54
Chapitre III Méthode de résolution numérique		56
III.1	Généralités sur le logiciel de simulation.....	56
III.1.1	Description du code de calcul fluent :	56
III.1.2	Etape de la simulation numérique	57
III.1.3	Configuration, Solution et Résultats sur Fluent :	70
III.2	Modèle étudié :	77
III.2.1	DesignModeler :	77
III.2.2	Meshing :	78
III.2.3	Propriétés thermophysiques des matériaux :	78
III.2.4	Paramètres de simulation utilisés :	79
III.2.5	Conditions aux limites.....	79
III.2.6	Rapport de maillage	80
Chapitre IV		85
IV.1	Résultats des paramètres sur les paraffines :	85
IV.1.1	Paraffine 1 :	85
IV.1.2	Paraffine 2	87
IV.1.3	Paraffine 3 :	89
IV.2	Interprétation des tracés	91
IV.2.1	Tracé de la température	91
IV.2.2	Tracé de la fraction de fusion	93
IV.2.3	Tracé de densité.....	94
IV.2.4	Tracé de Nusselt :	95
IV.2.5	Tracé d'énergie :	96
IV.2.6	Processus de charge et décharge pour la 3 ^{ème} paraffine :	97
Conclusion générale		99
Référence :		101

Liste des tableaux

Tableau I-1 : Comparaison entre les différentes centrales CSP[19]	26
Tableau I-2 : Comparaison entre les différents principes de stockage [18]	35
Tableau I-3 : Propriétés thermo physique de quelques paraffines [23].....	37
Tableau I-4 : Propriétés thermo physique de quelques acides gras [23]	38
Tableau I-5 : Propriétés thermophysique de quelques sels hydratés [23]	40
Tableau II-1 : Longueur d'onde de divers rayonnement.....	51
Tableau III-1 : Propriétés thermophysiques des matériaux.....	78

Liste des figures

Figure I-1 : Principe de fonctionnement d'un panneau photovoltaïque [9]	19
Figure I-2 : Différents type des panneaux solaires [10, 11]	20
Figure I-3 : Capteur plan vitré [15]	21
Figure I-4 : Capteur plan non vitré [16]	22
Figure I-5 : Capteur plan sous vide [16]	22
Figure I-6 : Centrale a tour [18]	23
Figure I-7 : Concentrateur parabolique [18]	24
Figure I-8 : Concertateur cylindro parabolique [18]	25
Figure I-9 : Centrale miroir Fresnel [18].....	25
Figure I-10 : Principe de fonctionnement d'une éolienne [21]	27
Figure I-11 : Eolienne à axe horizontal [22]	27
Figure I-12 : Eolienne a axe vertical [2].....	28
Figure I-13 : Principe d'une centrale géothermique a différentes profondeurs [6].....	29
Figure I-14 :Différents principes du stockage thermique [14].....	32
Figure I-15 : Profil de changement de phase pour le stockage par chaleur latente[17]	34
Figure I-16 : principe de fonctionnement d'une centrale solaire a concentration [15].....	36
Figure I-17 : Divers types de MCP [21].....	37
Figure II-1 : Transfert thermique par conduction [29].....	44
Figure II-2 : Schéma de la convection forcée [32].....	47
Figure II-3 : Modes de transfert [33].....	50
Figure II-4 Différentes vues sur la géométrie du modèle.....	55
Figure III-2 : Procédure des volumes finis.....	57
Figure IV-1 : Isothermes paraffine1	86
Figure IV-2 : Fraction de fusion de la paraffine 1	86
Figure IV-3 : Isothermes paraffine 2.....	88
Figure IV-4 : Fraction de fusion de la paraffine 2.....	88
Figure IV-5 : Isothermes paraffine 3	89
Figure IV-6 : Fraction de fusion de la paraffine 3.....	90
Figure IV-7 : Graphe de température en fonction du temps.....	91
Figure IV-9 : Graphe de densité en fonction du temps	94

Nomenclature

D	Diamètre du conduit	[m]
h	Coefficient de transfert convectif	[W / m² .k]
λ	Conductivité thermique de fluide	[W / m.k]
L	Longueur	[m]
Nu	Nombre de Nusselt	
P	Pression	[Pa]
Pr	Nombre de Prandtl	(ν / α)
q	quantité de flux de chaleur	[W / m²]
r	Rayon de conduit	[m]
Ra	Nombre de Rayleigh	
Re	Nombre de Reynolds	
t	Temps	[s]
T	Température	[K]
V	Vitesse de l'écoulement du fluide	[m / s]

e l'énergie totale par unité de masse

Symboles grecs

α	Diffusivité thermique	[m²/s]
β	Coefficient volumique d'expansion thermique du fluide	[K⁻¹]
ν	Viscosité cinématique	[m²/s]
ρ	Masse volumique du fluide	[kg/m³]
τ	Tenseur des contraintes visqueuses	[N/m]
μ	Viscosité dynamique	[kg.m/s]
f	le vecteur de forces volumiques.	
∇	Opérateur Laplacien	

Introduction générale

Les effets néfastes de la combustion des énergies fossiles sur l'environnement et l'augmentation de leurs coûts et leur consommation ont provoqué chez les chercheurs scientifiques un besoin de trouver des solutions alternatives.

Ces solutions sont les énergies renouvelables qui sont issues de sources naturelles qui se renouvellent à un rythme supérieur à leur consommation, celles-ci sont considérées comme durables et inépuisables à l'échelle humaine et produisent généralement moins de gaz à effet de serre. Leur principale source est le soleil, bien qu'il présente de nombreux avantages, on lui trouve un inconvénient considérable qui est l'intermittence, qu'on peut expliquer par le fait que la production d'énergie repose directement sur un paramètre majeur qui est l'irradiation solaire, et celle-ci varie en fonction des conditions météorologiques, de la période de la journée et de la saison, ces éventualités rendent la production d'énergie non programmable, discontinue, peu prévisible à court terme et non conforme à la demande des utilisateurs (pics de consommation). Néanmoins afin d'atténuer ce problème de nombreuses moyens sont étudiés, notamment le stockage et l'hybridation :

- L'hybridation est une combinaison entre plusieurs sources d'énergies indépendantes afin de créer un système plus efficace, durable et fiable, cette technique vise à mettre en avant les avantages de ces sources comme compenser les fluctuations de puissance, tout en atténuant les inconvénients associés à chacune d'entre elles.
- Le stockage sert à préserver une quantité d'énergie pour une utilisation future et à assurer la réduction du décalage temporel entre l'offre et la demande. Cette énergie peut être stockée sous forme thermique. Le stockage de cette forme d'énergie est un paramètre clé pour ce genre d'installation en raison de l'intermittence de la distribution d'électricité qui est due aux variations de la demande. Il permet la production d'énergie dans les centrales solaires en fonction des besoins durant les heures non ensoleillées, en stockant l'énergie thermique dans un matériau solide stable pendant les heures d'ensoleillement.

Il subsiste trois concepts dans le domaine du stockage thermique : le stockage par chaleur latente, chaleur sensible, et par chaleur thermo-chimique. Le stockage par chaleur latente utilise l'enthalpie de ces matériaux à changement de phase et se concentre principalement sur leur passage du solide au liquide, tout le contraire du stockage par chaleur sensible qui se traduit par une énergie transférée entre deux substances grâce à l'augmentation de la température sans le changement de phase. Alors que la chaleur thermo-chimique se réfère à l'énergie thermique qui est libérée ou absorbée lors de réactions chimiques.

Le présent travail est suivi d'une étude sur le stockage thermique par chaleur latente utilisant un matériau à changement de phase (PCM), avec une période de charge et décharge, le matériau de stockage ne circule pas dans l'enceinte il est séparé du fluide caloporteur. Pour assurer le transfert entre les deux milieux le système est de type tubulaire avec deux modes de transfert qui sont la conduction et la convection. L'étude numérique a pour but l'analyse des performances d'une unité de stockage thermique sous l'effet de changement de matériau de stockage.

La dynamique de recherche initiée par cette thèse a débuté par le chapitre 1 qui porte sur l'état de l'art d'une généralité sur les énergies renouvelables en passant par l'énergie solaire, éolienne, géothermique, hydraulique, biomasse et hydrogène et une généralité sur le stockage thermique avec ses principes, ses concepts et son intérêt dans les centrales thermiques.

Le deuxième chapitre permet aux lecteurs d'apprécier les généralités sur le transfert de chaleur et ses lois ainsi que celles de modélisation mathématique de bases, et s'achève par la présentation de la géométrie du modèle étudié.

Le troisième chapitre traite la méthode de résolution numérique tout en définissant le logiciel de simulation utilisé qui est Ansys Fluent.

Le quatrième chapitre décrit les principaux résultats numériques issus des simulations de technologie et leurs discussions.

En conclusion générale, cette thèse a été clôturée par une présentation de la géométrie de la structure avec les différents matériaux utilisés, les conditions aux limites et la méthode de solution tout en abordant le sujet des paramètres fixes et variables avec en conclusion les principaux résultats

Chapitre I

État de l'art et recherche bibliographique

I.1 Généralités sur les énergies renouvelables

I.1.1 Définition

Les énergies renouvelables (également appelés énergies vertes ou énergies propres) sont des énergies provenant de sources naturelles désignant un ensemble de moyens pour produire de l'énergie à partir de ressources théoriquement illimitées qui se renouvellent à un rythme supérieur à celui de leur consommation. Tout le contraire des énergies non renouvelables couramment appelés énergies fossiles qui sont des ressources dont les réserves sont limités et non renouvelables à l'échelle humaine.[1, 2]

I.1.2 Différents types

Il existe cinq (5) principaux types d'énergies renouvelables, leurs particularités communes est de ne pas produire d'émissions polluantes.[3]

I.1.2.1 Energie solaire :

Malgré la distance de 150 millions de km qui nous sépare du soleil, il est essentiel pour cette terre. Indirectement c'est la source des hydrocarbures fossiles et des énergies renouvelables. Ainsi il est directement responsable de « l'énergie solaire » qui est issue de fusions nucléaires, cette expression est utilisée afin de désigner l'électricité ou l'énergie thermique obtenue à partir d'une source énergétique primaire qu'est le rayonnement solaire constitué lui-même de photons qui sont des composants fondamentaux de la lumière.[4-6]

I.1.2.1.1 Energie solaire photovoltaïque :

Cette énergie a pour but de convertir le rayonnement solaire directement en électricité, et pour que cette opération soit fonctionnelle, il existe un processus à suivre en commençant par les modules photovoltaïques qui sont un assemblage de matériaux semi-conducteurs appelés

Chapitre I : Etat de l'art et recherche bibliographique

« cellules photovoltaïques » fabriqués en silicium. Dans le but de comprendre le fonctionnement de cette cellule photovoltaïque, il est indispensable de connaître l'effet du même nom qui en est à l'origine. L'effet photovoltaïque est une particularité qu'ont quelques matériaux à convertir la lumière en électricité, il s'agit d'un phénomène physique durant lequel un matériau émet des électrons sous l'effet de la lumière. Tous les semi-conducteurs présentent cet effet, avec plus ou moins d'efficacité. Chaque photon (particule de lumière) pénétrant le matériau perd son énergie en créant des paires électrons-protons. Chaque paire induit une charge négative (les électrons) et une charge positive (les protons). Ainsi séparés, les électrons peuvent être collectés pour créer un courant, comme dans une pile.[5, 7, 8]

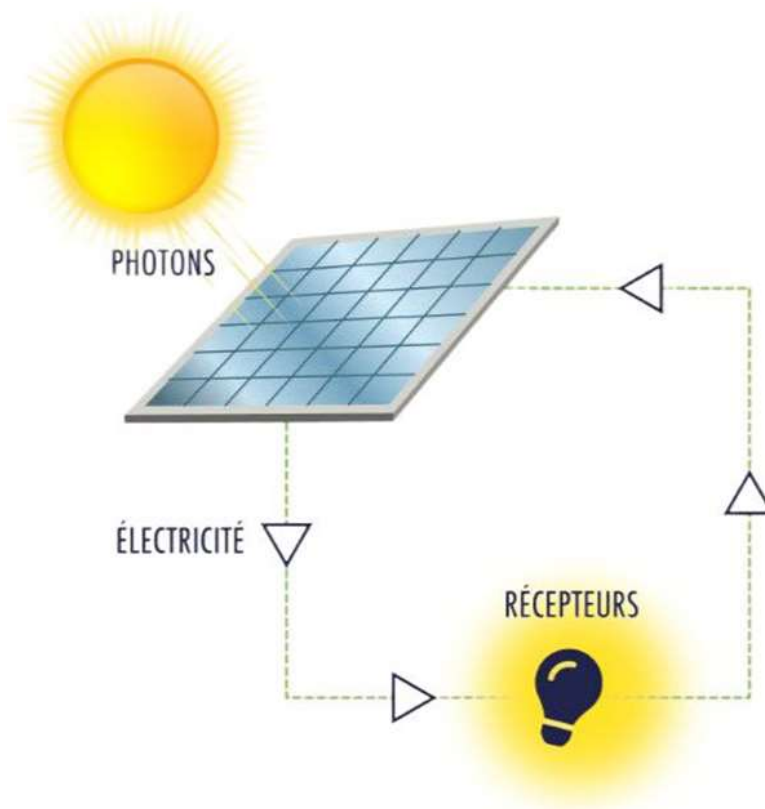


Figure I-1 : Principe de fonctionnement d'un panneau photovoltaïque [9]

Il existe 3 types de panneaux solaires photovoltaïques :

I.1.2.1.1 Panneaux solaires monocristallins :

Ce sont des panneaux caractérisés par des cellules à couches épaisses, hautement performantes et pure, fabriqués d'un seul bloc de silicium fondu, offrant un rendement de 20 %, esthétiquement avec leur couleur bleu foncé homogène ils sont plus attrayants, on trouve leurs particularités dans le fait qu'ils ne sont pas parfaitement carrés, les coins sont coupés. Cette technique de « couper les coins » aide le flux d'énergie à être encore plus efficace. Les

Chapitre I : Etat de l'art et rechercher bibliographique

électrons voyagent le long des « barres omnibus», qui est la doublure d'argent visible entre les cellules solaires. En diminuant la netteté des coins de chaque cellule solaire, les électrons peuvent voyager plus rapidement à travers le panneau.[8, 10]

I.1.2.1.1.2 Panneaux solaires poly cristallins :

Malgré la différence de rendement avec les panneaux monocristallins qui est de 3 à 4%, leurs résistances aux intempéries et leurs bas coûts les rends très appréciés par les propriétaires des maisons individuelles, constitués de multiples cristaux de silicium de coupe carrée (coins droits), ils ont tendance à être un peu plus bleues et semblent avoir des confettis brillants à l'intérieur. Ces « confettis » bleus sont les cristaux utilisés pour solidifier le silicium. L'inconvénient de ce type de cristal est qu'il a des « lacunes » où chacun se rencontre où se chevauche. Les électrons sont piégés entre les cristaux, ce qui rend leurs efficacité inférieure.[8, 10]

I.1.2.1.1.3 Panneaux solaires à couches minces :

Ce sont des modules qui prennent beaucoup plus de places sur les toits que les monocristallins et les polycristallins et leurs coûts de fabrication et leurs rendements sont considérablement faible. C'est pourquoi ils sont surtout utilisés dans les centrales solaires, où la surface n'est pas limitée et le coût est bas. Principalement constitués de silicium amorphe, le matériau semi-conducteur est déposé en couches extrêmement fines par évaporation ou par pulvérisation sur une plaque de verre ou un autre support.[8, 10]



Cellules polycristallines

cellules monocristallines

cellules couches minces

Figure I-2 : Différents type des panneaux solaires [10, 11]

I.1.2.1.2 Energie solaire thermiques :

Contrairement à l'énergie solaire photovoltaïque, le système solaire thermique exploite le rayonnement solaire afin de le transformer directement en chaleur (énergie calorifique) par le biais des capteurs solaires thermiques ou une installation solaire thermodynamique (CSP),

Chapitre I : Etat de l'art et rechercher bibliographique

Cette énergie peut être utilisée pour le chauffage, mais également pour produire de l'électricité.[5, 12]

Il existe 2 types de technologies :

I.1.2.1.2.1 Energie solaire à basse température :

Il s'agit de mécanismes opérant à une température de moins de 100°C, pour les usages de l'habitat et du secteur tertiaire (eau chaude sanitaire et chauffage) et pour les divers besoins de l'industrie. On utilise des capteurs thermiques, destinés à absorber la chaleur solaire et à la restituer à un fluide caloporteur qui circule vers les lieux d'utilisation. Pour cela il existe plusieurs types de capteurs :[5, 13]

▪ Capteurs plans vitrés :

C'est le modèle le plus répandu robuste avec une simple structure utilisée pour les températures d'environ 70°C, il est question de caisson isolé sur les faces arrière et latérales couvert par un vitrage haute transmission et à faible déperdition, composé intérieurement d'absorbeur sous forme de serpentin contenant le fluide à réchauffer. Pour que ce dernier absorbe mieux la chaleur, il est bordé par des ailettes de couleur noire, qui transmettent mieux la chaleur absorbée. [14]



Figure I-3 : Capteur plan vitré [15]

▪ Capteurs plans non vitrés :

Clairement moins fréquent que les capteurs plan vitrés, dépendant de la température de l'air, constitués d'absorbeur sans caisse ni vitrage ce qui rend la fabrication simple et diminue leurs coûts, utilisé pour les températures de 30°C en période estivale comme le réchauffement des piscines.[14]



Figure I-4 : Capteur plan non vitré [16]

▪ **Capteurs sous vides :**

C'est le type de panneaux de haute technologie sous forme de tubes cylindriques, montés en parallèle aux parois de verre vide de l'intérieur de manière à réduire les pertes par convection et conduction d'où le nom de tubes sous vides, comprenant un absorbeur plan ou concentrique en contact avec une tuyauterie en cuivre. Comme les capteurs peuvent atteindre des températures de 150 °C le fluide calorifique qui passe dans les tubes est spécial.[14]

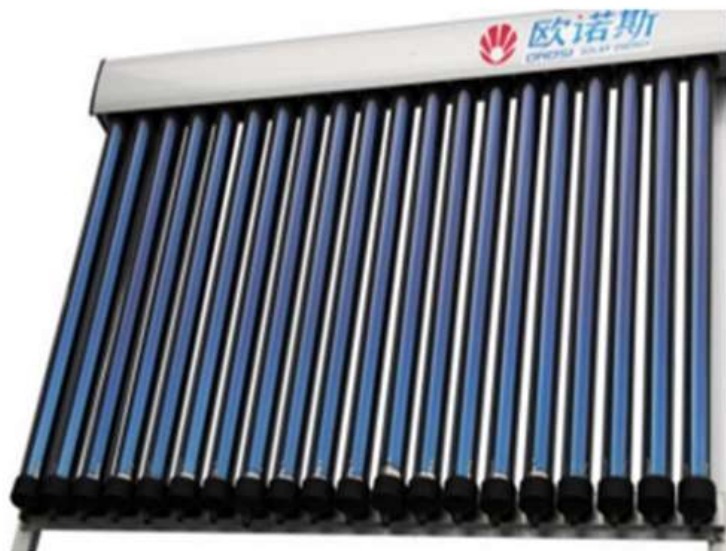


Figure I-5 : Capteur plan sous vide [16]

I.1.2.1.2.2 Energie solaire à haute température :

Il est essentiel de concentrer l'énergie solaire car elle est peu dense, dans le but d'augmenter la densité du flux de photons sur une surface donnée afin d'atteindre des niveaux de températures assurant des rendements intéressants de la production d'électricité.

Cette technologie permet de capter le rayonnement à l'aide des capteurs solaire atteignant des hautes températures allant de 250 °C à 1000 °C en concentrant ce rayonnement par un système de miroirs(réflecteurs) tout en le dirigeant vers un récepteur qui contient le fluide caloporteur, cette chaleur est ensuite transmise à un fluide thermodynamique, ce pouvoir calorifique est utilisé pour actionner les turbines à gaz et les turbines à vapeur pour produire de l'électricité.[5, 13, 17]

On trouve 2 types de centrales solaires :

- **Concentration a foyer :**
 - **Centrale à tour :**

Sont utilisées pour des productions à grande échelle, composées de plusieurs miroirs appelés héliostats qui concentrent les rayons vers un récepteur situé au sommet d'une tour. Chaque héliostat réfléchis les rayons avec précision vers le récepteur. Un fluide caloporteur (HTF) circule dans l'absorbeur, emmagasinant l'énergie thermique produite. Les températures atteintes sont entre 600 et 1000 °C

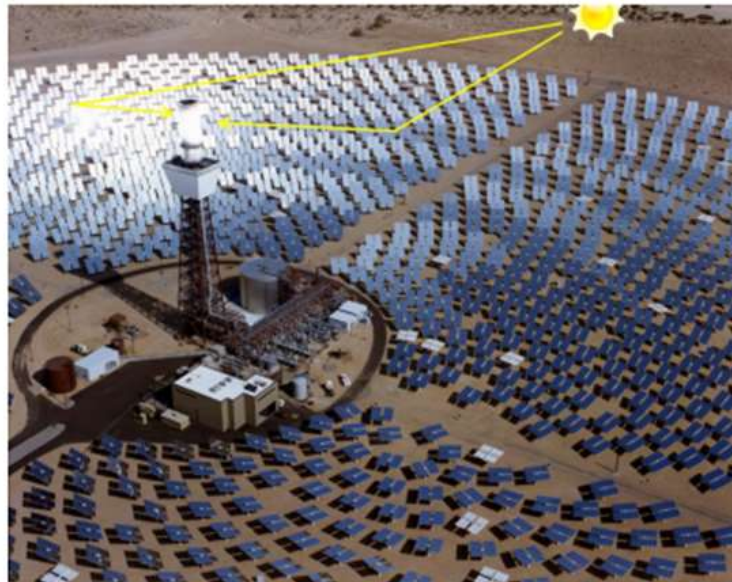


Figure I-6 : Centrale a tour [18]

- **Concentrateur parabolique (dish-stirling) :**

Chapitre I : Etat de l'art et recherche bibliographique

Le mécanisme Dish-Stirling est constitué des éléments suivants :

- Un miroir parabolique,
- Un moteur Stirling avec générateur
- Un capteur solaire ou récepteur
- Un traqueur solaire.

Le miroir parabolique intercepte le rayonnement solaire et le concentre sur le récepteur où il sera transformé en énergie thermique atteignant une température de fonctionnement de 1500°C. Ce système utilise un suiveur solaire (tracking) afin de faciliter le travail du concentrateur pour suivre les rayons du soleil, ce dernier est placé dans une monture permettant les mouvements indispensables à son pointage.



Figure I-7 : Concentrateur parabolique [18]

- **Concentration linéaire :**

- **Cylindro-parabolique :**

Les rayons solaires sont concentrés sur un tube horizontal situé sur l'axe focal, où circule un fluide caloporteur qui servira à transporter la chaleur vers la centrale elle-même. La température du fluide peut monter jusqu'à 400°C. Cette énergie est transférée à un circuit d'eau, la vapeur alors produite actionne une turbine qui produit de l'électricité.

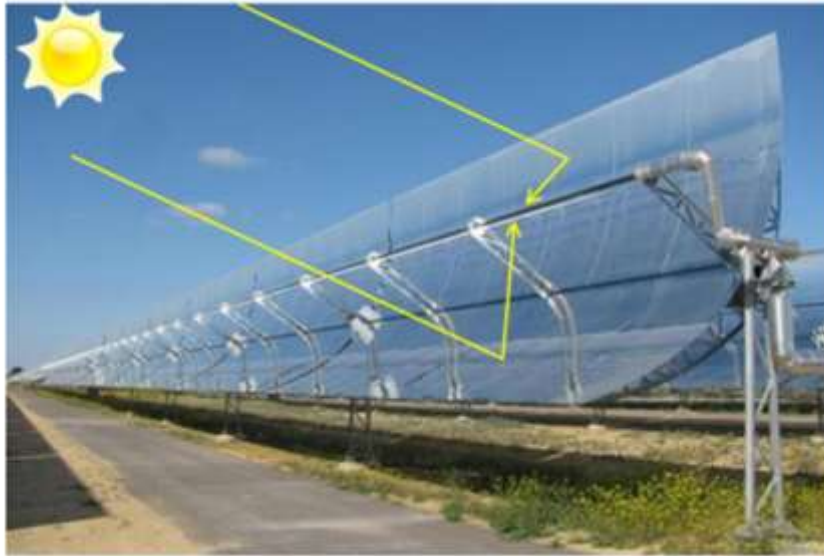


Figure I-8 : Concertateur cylindro parabolique [18]

Dans le cas d'une centrale cylindro-parabolique le tube englobant le fluide est un tube métallique placé sous vide à l'intérieur d'un autre tube en verre appelé tube Dewar et tient son nom du physicien et chimiste James Dewar.[19]

- **Miroirs Fresnel :**

Ces longs miroirs parfaitement plans, dits aussi « réflecteurs compacts linéaires », sont agencés de façon à pivoter suivant la course du soleil. Tant que celui-ci est sur zone, ils peuvent diriger les rayons en les concentrant vers le gros tube absorbeur placé en surplomb.

Ce tube horizontal, lui-même surmonté d'un miroir secondaire cintré, comporte un fluide caloporteur qui est chauffé à 500°C.[17]



Figure I-9 : Centrale miroir Fresnel [18]

Chapitre I : Etat de l'art et rechercher bibliographique

Tableau I-1 : Comparaison entre les différentes centrales CSP[19]

	Cylindro- parabolique	Linéaire Fresnel	Centrale tour	à Concentrateur parabolique			
Puissance (MW)	10-200		10-150	0.1-0.4			
Concentration	70-80	25-100	300-1000	1000-3000			
Température opératoire (°C)	200-500		600-1000				
Rendement max solaire (%)	21 (e)	20 (p)	20 (e)	35 (p)	29 (e)		
Rendement solaire annuel (%)	10-15 (e)	17-18 (p)	9-11 (p)	8-10 (e)	15-25 (p)	16-18 (e)	18-23 (p)
Rendement cycle thermique (%)	30-40 ST		45-55 CC	30-40 Stirling	45-55 GT		
Facteur de capacité (%)	24 (e)	25-70 (p)	25 (p)				
Surface utilisée au sol (m ² .MW.h ⁻¹ .an ⁻¹)	6-8	4-6	8-12				

(e) : expérimentée, (p) : prototype, ST : turbine a vapeur, CC : cycle combiné, GT : turbine a gaz

Rendement solaire : puissance électrique générée /puissance incidente

I.1.2.2 Energie éolienne :

Est une solution pour satisfaire le besoin en électricité dans un site isolé et venté, le soleil chauffe des zones inégalement sur cette terre ce qui crée des écarts de températures et de pressions, en conséquence les masses d'air se mettent en mouvement et accumulant une forme d'énergie appelée cinétique qui elle-même transformée en mécanique par le moyen d'un arbre de transmission puis en énergie électrique par l'intermédiaire d'une génératrice, ces transformations sont actionné par le biais d'un dispositif appelé aérogénérateur. Ce dernier dans sa configuration la plus commune est composée d'un rotor comportant 3 pales, la capacité de production d'électricité repose sur la longueur des pales, ainsi d'une nacelle qui regroupe tous les composants permettant de lier la génératrice courant continu au rotor :

l'arbre primaire et secondaire, le multiplicateur et enfin d'un mat permettant de maintenir cet appareil en hauteur.[20, 21]

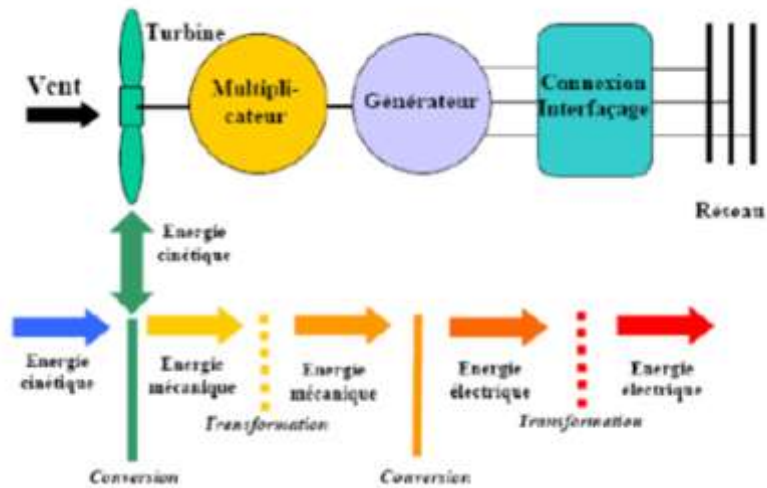


Figure I-10 : Principe de fonctionnement d'une éolienne [21]

Il existe 2 différents types d'éolienne :

I.1.2.2.1 Eolienne à axe horizontal :

Les plus couramment utilisées, elles nécessitent beaucoup de places de ce fait elles sont implantées dans les zones rurales ou en mer, basées sur les principes des moulins à vent elles comportent généralement 3 pales.[20]



Figure I-11 : Eolienne à axe horizontal [22]

I.1.2.2 Eoliennes à axe vertical :

Ayant une faible efficacité puisqu'elles captent deux fois moins d'énergies dans le vent cela est dû à l'emplacement de l'axe du rotor qui est perpendiculaire au sol.[1]

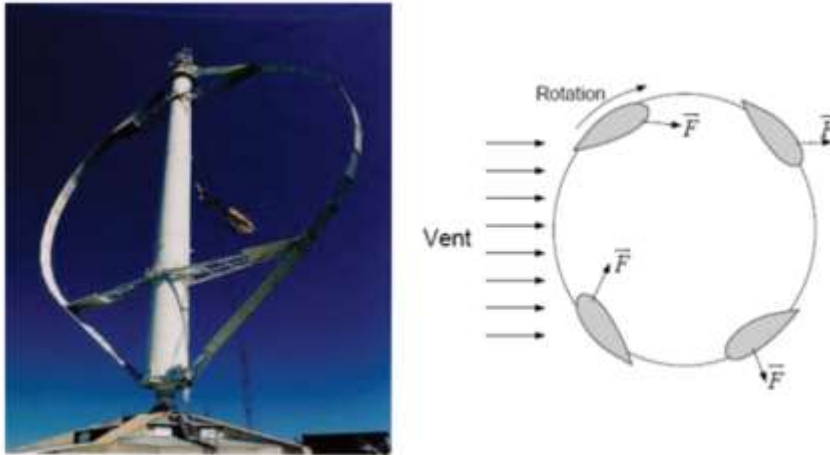


Figure I-12 : Eolienne a axe vertical [2]

I.1.2.3 Energie géothermique :

Appelée énergie du cœur de la terre, cette énergie est représentée comme la chaleur stockée de manière permanente au-dessous de la surface du sol en raison du soleil qui chauffe la terre et de la présence d'un noyau constitué de magma.

Il existe 3 grands types de l'énergie géothermique

I.1.2.3.1 Géothermie basse température :

Dite géothermie de surface consacré pour le chauffage des maisons et des bâtiments, les puits installés pour ce type d'énergie peuvent aller de 80 à 400 mètres de profondeurs où la température reste inférieure à 30°C.

I.1.2.3.2 Géothermie moyenne température :

En utilisant les installations hydrothermales, on atteint des sources d'eau naturellement chaude sur tous les continents se situant à 3000 mètres de profondeur visant à atteindre 50-70°C, cette forme de géothermie est utilisée pour le chauffage à des degrés supérieurs.

I.1.2.3.3 Géothermie haute température :

Il est toujours possible de profiter de la chaleur de la terre même en absence des sources thermales, pour cela on monte des installations pétrothermales profondes, les tours de forages creusent des puits de 3'000 à 5'000 mètres, en vue d'installer des sondes qui traversent la

Chapitre I : Etat de l'art et recherche bibliographique

roche à très haute température. On y envoie ensuite du liquide remontant à plus de 200°C. Ce liquide est alors utilisé pour la production d'électricité. [3, 4] [5]

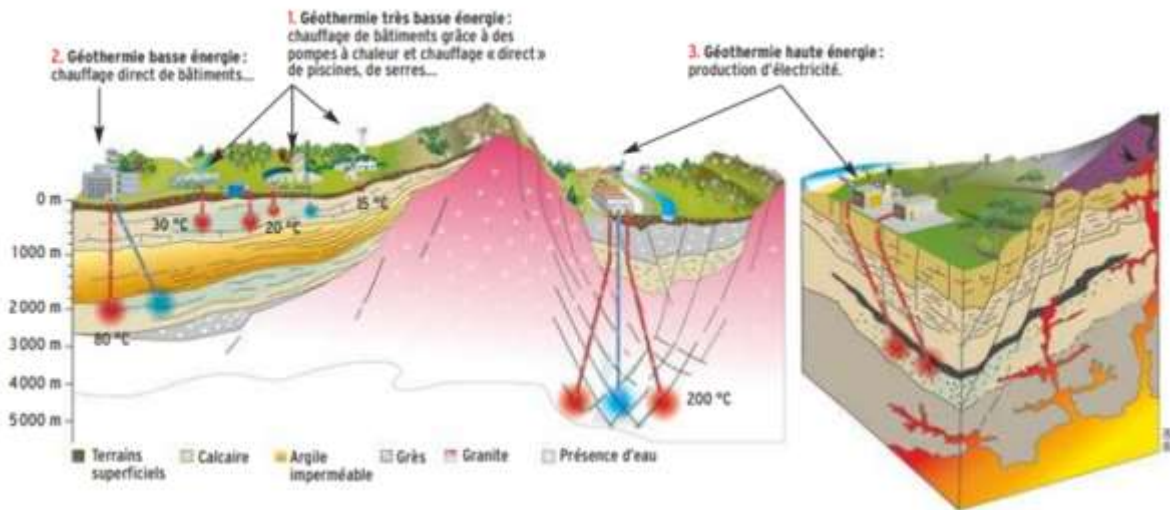


Figure I-13 : Principe d'une centrale géothermique a différentes profondeurs [6].

I.1.2.4 Énergie hydraulique :

C'est l'énergie cinétique liée aux mouvements d'eaux dans toutes ses formes comme dans les courants marins, et les marées. Ce mouvement peut être utilisé directement, par exemple avec un moulin à eau, ou plus couramment être convertis en énergie électrique dans une centrale hydroélectrique.

I.1.2.4.1 Centrale à haute chute :

C'est une centrale qu'on trouve dans les régions très montagneuses là où la hauteur des chutes dépasse les 300 mètres, elle utilise généralement une turbine à injection partielle et à veine libre qui est la turbine Pelton étant donné que la capacité du réservoir est faible.

I.1.2.4.2 Centrale à moyenne chute :

Ces barrages se situent dans une région montagneuse de 30 à 300 mètres de hauteur, elles tirent leur énergie des réserves d'eau stockées temporairement.

I.1.2.4.3 Centrale à basse chute :

Ces centrales sont fondées sur une chute d'eau inférieure à 30 mètres de hauteur, elles utilisent les turbines Kaplan ou Francis, et dans ce cas l'électricité est produite en temps réel étant donné qu'il n'y a pas réservoir pour la retenue d'eau.[7, 8]

I.1.2.5 Énergie biomasse :

L'expression biomasse fait référence à tous les êtres vivants spécialement aux produits végétaux, en d'autres termes l'ensemble des organismes végétaux capables de recueillir leur énergie solaire et la stocker via divers techniques de transformations, qui sont ensuite converties en différentes sources d'énergie, telles que :

I.1.2.5.1 Chaleur et électricité :

Le bois, les déchets agricoles et les déchets industriels du secteur agroalimentaire sont la matière première de cette énergie, en subissant une transformation thermo-chimique (combustion, pyrolyse, gazéification) pour générer principalement de la chaleur et de l'électricité.

I.1.2.5.2 Biocarburant :

- **Carburant bioéthanol :** A travers une technique de fermentation alcoolique, on produit à partir d'amidon et de glucose extraits de cultures sucrières (betteraves, canne à sucre) et de céréales (blé, maïs).
- **Carburants biogaz :** il assimile des plantes oléagineuses (colza, tournesol et soja), l'huile tirée de leurs graines permet de produire du biodiesel, qui peut remplacer le gazole actuellement utilisé dans les moteurs diesel.[9, 10]

On peut ajouter à ces 5 grands types d'énergies renouvelables une nouvelle énergie exploitée qui est l'énergie d'hydrogène

I.1.2.6 Énergie hydrogène :

Présentée comme une énergie parallèle aux hydrocarbures fossiles, et comme un levier pour faire baisser les émissions de gaz à effet de serre de certains secteurs, l'hydrogène présente certaines caractéristiques physico-chimiques avantageuses d'un point de vue énergétique, qui sont sa légèreté et son pouvoir calorifique élevé, son seul inconvénient est que bien qu'il soit très abondant sur cette terre, il n'existe pas dans son état pur et naturel.

Les différents types d'hydrogène :

I.1.2.6.1 Hydrogène vert :

Produit par moyen d'électricité provenant d'énergie renouvelée par une technique appelée électrolyse de l'eau.

I.1.2.6.2 L'hydrogène gris :

Elaboré à partir de dispositif thermochimique avec des sources fossiles comme matière première.

I.1.2.6.3 Hydrogène bleu :

Suivant le même processus de fabrication de l'hydrogène gris, sa particularité est que le CO₂ émis lors de la fabrication sera capté pour être réutilisé ou stocké.[11, 12]

I.2 Généralités sur les systèmes de stockages :

I.2.1 Définition

I.2.1.1 Définition littéraire :

Au moment où la production est considérablement plus forte que la consommation, un ensemble de dispositif d'un système permettant l'accumulation de l'excès de génération de chaleur est adoptée afin de la restituer lorsque les circonstances le justifient.

I.2.1.2 Définition scientifique :

L'énergie solaire est d'une nature intermittente et aléatoire dépendante des fluctuations météorologiques étant donné que seul les rayons solaires direct sont exploitables, c'est pour cette raison qu'elle seule ne peut subvenir aux besoins quotidiens, et dans le but d'éviter la conversion de l'énergie d'une forme a une autre, le déploiement du stockage d'énergie thermique (qui est un procédé thermophysique ayant pour principal objectif la charge et la décharge efficace de chaleur) est l'une des solutions les plus performantes et économique avisant la réduction des pertes de chaleur, cette technologie est prête à être mise a profit pour le stockage des énergies renouvelables et surtout au sein d'une centrale CSP cela permet une réduction des frais de production de l'électricité et une augmentation de fiabilité.

Le stockage de l'énergie thermique ou de chaleur est réalisé en exploitant des phénomènes induits au sein du matériau de stockage. Le phénomène correspond à l'augmentation ou à la diminution de l'énergie interne d'une substance par réchauffement ou refroidissement. [13]

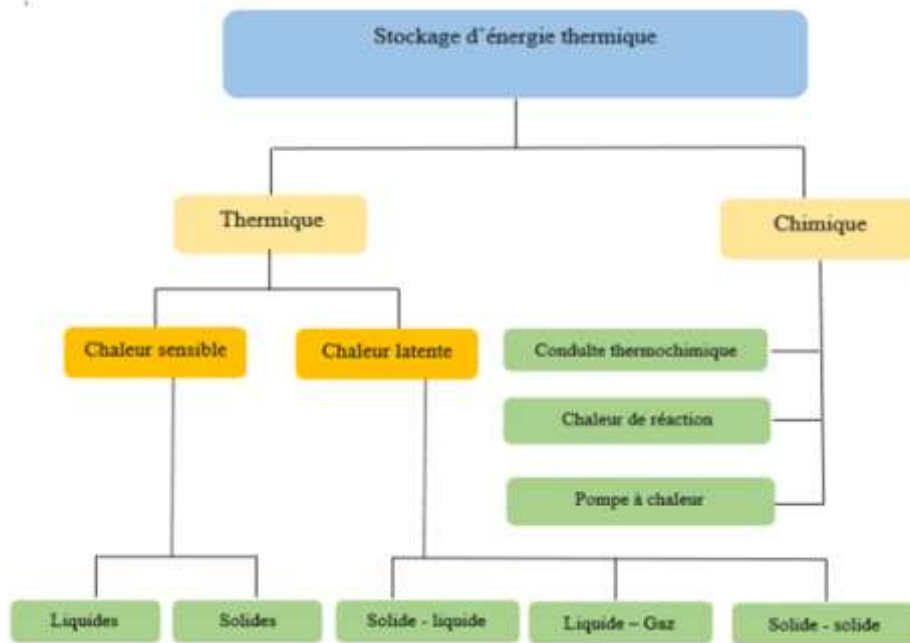


Figure I-14 : Différents principes du stockage thermique [14]

I.2.2 Principes du stockage thermique :

I.2.2.1 Stockage par chaleur sensible :

C'est la méthode de stockage la plus ancienne et la plus simple, elle se résume à utiliser les caractéristiques calorifiques d'un matériau avec uniquement une simple variation de température de celui-ci. La quantité d'énergie emmagasinée repose sur la chaleur spécifique du corps, de l'écart de température qu'il subit et de la quantité de matière présente.[15]

$$Q = \int_{T_i}^{T_f} m \times C_p \times dT \quad (I-1)$$

Avec :

- Q : est la quantité d'énergie stockée (J).
- m : est la masse du matériau de stockage (kg).
- Cp : la chaleur spécifique du matériau de stockage (J.kg⁻¹ .K⁻¹).
- dT : est la variation de la température durant l'étape de charge (K).

Cette forme de stockage est isobare ce qui veut dire qu'elle agit à pression constante et est efficace dans les systèmes à large intervalle de température, sans pour autant négliger les pertes pour une meilleure efficacité.

Tout au long de la phase de charge, l'énergie thermique est transférée au média afin d'augmenter sa température. Celui-ci est stocké à la température de travail de l'étape de

charge. Lors de la décharge, le média est refroidi afin de récupérer l'énergie thermique emmagasinée.

I.2.2.2 Stockage par chaleur latente :

Le matériau utilisé dans un système de stockage par chaleur latente est couramment appelé PCM (Phase Change Material), le phénomène nécessite le changement d'état par le biais de chauffage du matériau.

Avec :

$$Q = \int_{T_{\text{froid}}}^{T_{\text{fusion}}} m \times C_{p_s} \times dT + m \times \Delta L + \int_{T_{\text{fusion}}}^{T_{\text{chaud}}} m \times C_{p_l} \times dT \quad (\text{I-2})$$

- Q : la quantité d'énergie stockée (J) ;
- M : la masse du matériau de stockage (kg) ;
- C_{p_s} et C_{p_l} : respectivement les chaleurs spécifiques des matériaux solide et liquide (J/kg.K) ;
- ΔL l'enthalpie de changement de phase (J/kg) ;
- dT est variation de la température durant l'étape de charge (K).

Tout au long de l'étape de fusion, le matériau stocke une certaine énergie, définie par sa chaleur latente de fusion (variation d'enthalpie du corps lors de sa fusion). Le changement de phase intervient idéalement (pour un corps pur) à température constante correspondant à sa température de fusion. Puis le système libère une énergie sensiblement équivalente à la même température durant le processus de solidification. Lors d'un processus de stockage en chaleur latente, une grande quantité d'énergie peut être emmagasinée dans une gamme de température réduite autour de la température de changement d'état en utilisant la chaleur émise durant le passage d'un matériau de l'état liquide à l'état solide [15]

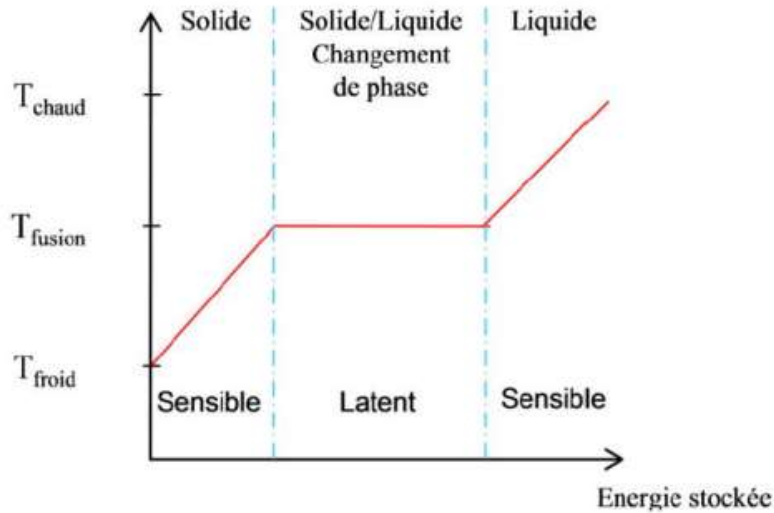
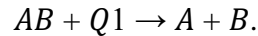


Figure I-15 : Profil de changement de phase pour le stockage par chaleur latente[17]

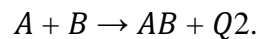
I.2.2.3 Stockage par chaleur thermochimique :

L'utilisation de quelques réactions physico-chimiques réversibles est une solution pour le stockage thermique de l'énergie qui est basé sur l'énergie des liaisons des composés chimiques. Le principe de base du stockage thermochimique est décrit par les équations :

Réaction endothermique :



Réaction exothermique :



La quantité d'énergie stockée est exprimée selon la relation :

$$Q = \sum_{i=1}^n m_i \times C_p \times dT + nA \times \Delta Hr \quad (I-3)$$

Avec :

Q : est la quantité d'énergie stockée (J).

nA : est le nombre de moles du produit A (mol).

ΔHr : est l'enthalpie de la réaction ($J.mol^{-1}$).[14]

I.2.3 Comparaison entre les différents principes de stockage :

Tableau I-2 : Comparaison entre les différents principes de stockage [18]

		Stockage par Chaleur sensible	Stockage par chaleur latente	Stockage par voie Thermochimique
Densité D'énergie	Volumétrique	Faible~ 15-60kWh.m ⁻³	Moyenne ~ 50 -100 kWh.m ⁻³	Elevée ~ 100-500kWh.m ⁻³
	Massique	Faible ~ 0,02-0,03kWh.kg ⁻¹	Moyenne~ 0,05-0,1kWh.kg ⁻¹	Haute~ 0,5-1 kWh.kg ⁻¹
Température De stockage		Température de l'étape de Charge	Température de l'étape de Charge	Température de l'étape de charge ou ambiante
Durée de Stockage		Limitée (Pertes thermiques)	Limitée (Pertes Thermiques)	Théoriquement Illimitée
Transport de L'énergie		Faible distance	Faible distance	Distance Théoriquement Illimitée
Maturité		Echelle industrielle (20 MW _e)	Echelle pilote (100 kW _{th})	Echelle laboratoire (1-5 kW _{th})
Technologie		Simple	Moyenne	Complexe

I.2.4 Intérêt du stockage dans les centrale CSP

Le fonctionnement d'une centrale CSP est contrainte par l'intermittence de l'énergie solaire, et parce qu'elles présentent l'énorme avantage d'avoir la possibilité de stocker de l'énergie thermique. La plupart des centrales actuellement en fonctionnement intègrent un stockage thermique permettant notamment d'allonger la durée de production, et donc de diminuer le coût de l'énergie produite

Deux échelles de temps apparaissent, les systèmes de stockage à court terme (< 1 h) qui ont pour objectif de :

- maintenir la production constante pendant les passages nuageux ;
- diminuer le nombre de phases de démarrage et d'arrêt des turbines ;

Et, les systèmes de stockage de masse (> 1 h) qui ont pour objectif de : [15, 17]

- optimiser le fonctionnement des turbines ;
- adapter au maximum la production à la demande ;

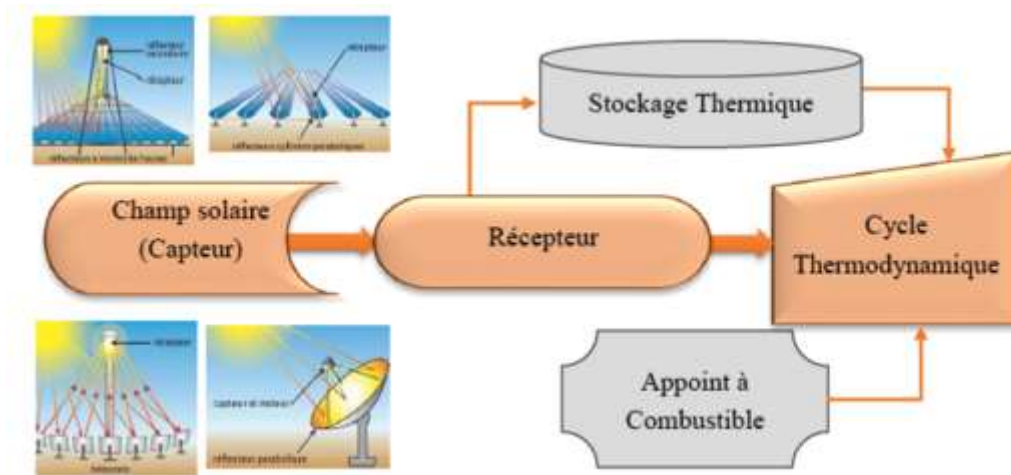


Figure I-16 : Principe de fonctionnement d'une centrale solaire a concentration [15]

I.2.5 Concepts de stockage thermique :

Les procédés de stockage d'énergie thermique dans une centrale solaire thermodynamique peuvent être classés en deux concepts : actifs ou passifs.

Lorsque le matériau de stockage circule dans la centrale ce cas-là est qualifié de stockage thermique actif. Ce type de stockage se sous divise encore en deux catégories :

- le stockage actif direct quand le matériau circule dans le champ solaire ;
- le stockage actif indirect dans le cas contraire.

À l'inverse, dans le cas d'un système de stockage d'énergie thermique passif le matériau de stockage ne circule pas dans le procédé. L'énergie thermique du champ solaire transitant via un fluide caloporteur, est transférée vers le matériau de stockage à l'aide d'un échangeur. La structure de l'échangeur de chaleur est au sein même du matériau de stockage.[19].

I.2.6 Matériaux à changement de phase PCM

I.2.6.1 Définition

Appelé les MCP, ce sont des fondements de stockage de chaleur latente au cours du processus de fusion et de sa restitution pendant la solidification en conservant une température constante et importante densité de stockage. Un changement d'état solide à l'état liquide est dû à une augmentation de température par réaction endothermique accompagnée d'une absorption de chaleur. Et vice versa, une diminution de température induit un changement de la phase liquide à la phase solide par réaction exothermique avec une libération de chaleur. Les MCP fondent et se solidifient dans une large plage de températures, ce qui les rend attrayants pour diverses applications.[18].

I.2.6.2 Classification des MCP

Il existe trois grandes familles de MCP qui sont disponibles dans n'importe quelle gamme de température souhaitée, et sont classées selon leurs natures chimiques. En contrepartie, le point de transition de phase dans une plage de fonctionnement pour la majorité d'entre eux, ne permet pas de satisfaire aux critères requis pour un support de stockage adéquat.[18, 20]

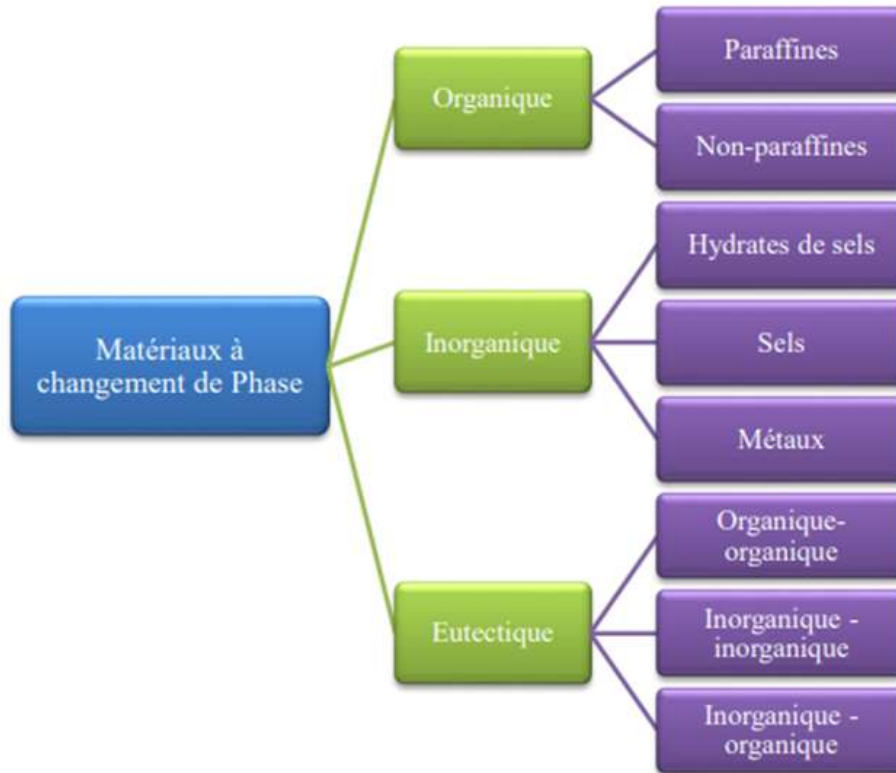


Figure I-17 : Divers types de MCP [21].

I.2.6.2.1 Composés organiques :

Ayant une plage de température comprise entre 0° C et 150 ° C, les substances les plus utilisées sont essentiellement à base de paraffine, des acides gras et des alcools de sucre. Ils comportent certains inconvénients comme une faible conductivité thermique et une chaleur latente plus petite, parallèlement ils présentent certains avantages comme leur stabilité chimique et leur large gamme de température et leur non corrosivité.[22]

- **Paraffines :**

En général, de formule C_nH_{2n+2} contenant entre 14 et 40 atomes de carbone, ce sont des matériaux organiques composés de mélanges hydrocarbures de la famille des alcanes, elles sont plus utilisées surtout pour les températures qui varient de -10 ° C à 100 ° C. [16, 20, 23, 24]

Tableau I-3 : Propriétés thermo physique de quelques paraffines [23]

Chapitre I : Etat de l'art et rechercher bibliographique

	T_f (°C)	Λ (J/kg)	C_p (J/kg/K)	ρ (kg/m ³)		λ (W/m.K)
				sol	liq	
Eicosane	36.7	246 000	2000	900	800	0.2
Hexacosane	56.3	256 000	2000	900	800	0.2
Triacotane	65.2	258 000	2000	900	800	0.2
Tétratriacontane	75.9	269 000	2000	900	800	0.2

- **Non-paraffines :**

Caractérisées comme des MCP avec des caractéristiques différentes contrairement aux paraffines qui ont des propriétés très similaires pouvant servir pour le stockage de l'énergie thermique. Des recherches portant principalement sur un certain nombre d'esters, d'acides gras, d'alcools et de glycols ont été menées. Elles ont conclu que ces matières sont extrêmement inflammables. Ces matières organiques peuvent être divisées en sous-groupes : les acides gras et les alcools de sucres.[18]

- **Acides gras :**

Les acides gras ont à peu près les mêmes propriétés thermo physiques que les paraffines présentant une faible corrosion et surfusion et presque les mêmes chaleurs de fusion mais avec une formule chimique différente $CH_3(CH_2)_{2n}COOH$. [18, 23, 24]

Tableau I-4 : Propriétés thermo physique de quelques acides gras [23]

	T_f (°C)	Λ (J/kg)	C_p (J/kg/K)	ρ (kg/m ³)	λ (W/m.K)
	(sol/fus)		(sol/liq)	(sol/liq)	(sol/liq)
Acide l'aurique	40/46	176 000	/	/	/
Acide myristique	50/57	168 000	/	/	/
Acide stéarique	52/58	181 000	/	/845	/
Acide palmitique	59/64	206 000	2200/2500	940/860	0.16

- **Alcools de sucre :**

Les alcools de sucre sont des produits extraits des plantes et peuvent être qualifiés de bio-sources. [24]

I.2.6.2.2 Composés inorganiques :

Quant aux composés inorganiques, ils ont une plage de températures de fusion comprise entre -100 °C et +1000°C. Ils ont plusieurs avantages : une importante chaleur latente, une haute conductivité thermique et Ils sont non-inflammables avec un coût d'investissement abordable généralement facilement disponibles. Les problèmes majeurs rencontrés lors de leurs utilisations la ségrégation, la corrosion et la surfusion.[22]

- **Sels hydratés :**

Les plus utilisés dans le groupe des composés inorganiques avec une structure cristalline qui contient de l'eau dans la formule $AB \cdot nH_2O$. Ils présentent de nombreux avantages tels qu'une forte chaleur latente de fusion par unité de volume, une conductivité thermique élevée, une faible variation de volume lors du changement de phase, et aussi un faible coût. Par contre, ils sont concernés par de forts inconvénients comme la fusion accompagnée de la séparation de phase, la corrosion et aussi le phénomène de surfusion qui est observé lorsque commence la cristallisation au point de changement de phase. L'utilisation des hydrates de sels comme MCP se résume à l'addition d'un épaississant ou d'agent de gélification de l'hydrate salin.[18, 23]

Chapitre I : Etat de l'art et recherche bibliographique

Tableau I-5 : Propriétés thermophysique de quelques sels hydratés [23]

Nom	T_f (°C)	Δ (J/kg)	C_p (J/kg/K) (sol/liq)	ρ (kg/m ³) (sol/liq)	λ (W/m.K) (sol/liq)
Acétate sodium trihydraté	58	264 000	3000	1287	0.42
Hydroxyde baryum octahydraté	78	301 000	1200	2180	/
Nitrate magnésium hexahydraté	90	163 000	1800/2500	1636/1550	0.67/0.49
$MgC_{12}.6H_2O$	117	167 000	2300/2600	1570/1450	2.25/2.61

- **Sels :**

L'intérêt d'utiliser ses sels demeure dans leur faible expansion volumique par rapport aux composés organique, formés à partir de cations et d'anions. Présentant un large spectre de température de fusion et une chaleur latente variable selon leurs types. Par exemple Les fluorures et les chlorures sont caractérisés par une chaleur latente plus élevée que les nitrates ou les sulfates, ayant pour avantage leurs utilisations à haute température dans le stockage thermique, mais ils ont aussi des inconvénients comme la surfusion.[23, 24]

- **Métaux :**

La technologie des métaux a été étudiés beaucoup plus comme fluide caloporteur et non pas comme MCP en raison de leurs poids, il s'agit essentiellement des métaux à fusions basses et des métaux eutectiques. Leurs utilisations comme MCP l'utilisation fait face à quelques problèmes, notamment pour leur conditionnement.[18, 20]

I.2.6.2.3 Composés eutectiques :

Ce sont des mélanges d'au moins deux substances dont la fusion et la solidification s'effectuent comme celles d'un corps pur dont la température d'équilibre solide-liquide est minimale, autrement dit que leur température de changement d'état est unique.[20, 23].

I.2.6.3 Critères pour le choix d'un bon MCP :

Afin d'effectuer le meilleur choix, il est nécessaire de respecter certains critères et se poser les bonnes questions.

- **Propriétés thermiques :**

- Une conductivité thermique élevée afin de faciliter la charge et la décharge.
- Une pression de vapeur faible pour but de minimiser les problèmes de tenue en pression des systèmes de stockage.
- Une chaleur latente supérieure à 130 KJ.
- Une haute densité, pour diminuer le volume du stockage.

- **Propriétés physiques :**

- Une masse volumique élevée afin de réaliser un bon stockage dans un volume réduit.
- Une fusion qui convient lors de l'utilisation d'un corps composé.
- Une tension de vapeur minimale afin de réduire les contraintes mécaniques dans le conteneur.
- Une stabilité des phases favorable pour le stockage et le déstockage de la chaleur.

- **Propriétés chimiques :**

- Une stabilité chimique au niveau transitoire et au niveau des températures
- Une bonne vitesse de cristallisation.
- Recyclable.
- Faible risque d'inflammabilité en contact avec la surface et faible corrosivité.

- **Propriétés cinétiques :**

- Une bonne vitesse de croissance cristalline.
- Une vitesse efficace de charge et décharge.
- Un faible taux de surfusion afin d'éviter le déstockage.

- **Propriétés économiques :**

- Un coût raisonnable
- La disponibilité.[18, 20, 22]

I.3 Recherches bibliographiques

- Une étude numérique a été faite par **Rieger, H., U. Projahn, et H. Beer** sur la fusion autour d'un cylindre horizontal noyé dans un matériau à changement de phase, la problématique a été traitée en conduction et convection, Les difficultés associées à la structure complexe en régime transitoire ont été surmontées avec succès en faisant une étude sur le maillage numérique appropriés à la géométrie, d'après les résultats obtenue en détails ils ont démontrés que la convection naturelle n'était pas négligeable[25].
- Afin de présager le comportement au cours du temps à deux régimes différents d'une unité de stockage constituée de tubes cylindriques en matériau à changement de phase (PCM), avec un fluide caloporteur (HTF) circulant à l'intérieur des tubes **Lacroix** a mis au point un modèle théorique de cylindre, la problématique de stockage traitée avec la méthode d'enthalpie couplée avec le transfert de chaleur par convection dans le fluide caloporteur. Les prédictions numériques sur les différents paramètres thermiques et géométriques sur le processus de transfert de chaleur et sur le comportement du système de stockage sont validées avec les données expérimentales. Et comme résultat pour but d'optimiser les performances de l'appareil le rayon du tube, le débit massique et la température d'entrée du fluide doivent être choisis minutieusement.[26].
- Une étude sur le changement de phase en mode transitoire d'un système de stockage de tubes verticaux en concevant un modèle numérique adapté par **Ismail et Abugderah**, la problématique de ce système consiste à la résolution des équations du HTF, MCP, et de la paroi du tube. Afin d'arriver à des résultats la méthode utilisée est la méthode des volumes finies sur le volume de contrôle. Le schéma utilisé pour résoudre les champs de la pression et de la vitesse de l'HTF est SIMPLE. La répartition radiale de la température, la position de l'interface solide/liquide et les variations de la chaleur latente et sensible accumulées, sont présentés pour différents nombres de Reynolds et de Stefan, et pour différente température de fusion/solidification et pour différente période.[27]

Chapitre II

Géométrie du modèle et formulation mathématique

II.1 Généralités sur le transfert de chaleur

II.1.1 Définition

Est un phénomène de transfert d'énergie microscopique désordonnée asymétrique puisqu'il diffère de la thermodynamique en traitant des systèmes non équilibrés. Il se manifeste à travers l'énergie appelée chaleur, pouvant être transférée entre deux systèmes ayant des températures différentes, cette différence est la force motrice de la chaleur transférée. Plus l'écart de température est important, plus le transfert est significatif.

Le transfert de chaleur ne se base pas seulement sur les lois de la thermodynamique cependant ces lois fixent le cadre de cette science, La première loi exige que le taux de transfert d'énergie dans un système soit égal au taux d'augmentation de l'énergie de ce même système. La deuxième loi exige que la chaleur soit transférée dans le sens d'une température décroissante.[28]

II.1.2 Différents modes de transfert de chaleur :

II.1.2.1 Conduction :

La conduction est un transfert d'énergie à l'influence macroscopique de l'activité interne physique existant au niveau atomique et moléculaire des particules les plus énergétiques d'une substance aux substances adjacentes moins énergétiques en raison des interactions entre les particules, la conduction entre les liquides et les gaz est due à l'impact et à la diffusion des molécules lors de leurs mouvements aléatoires, Dans les solides, cela est dû à la combinaison des vibrations des molécules dans un réseau et le transport d'énergie par les électrons libres.

Le taux de conduction thermique à travers un milieu dépend de la géométrie du milieu, son épaisseur et son matériau, ainsi que la différence de température à travers le support, sachant que plus l'isolation est épaisse, plus la perte de chaleur est faible et plus la géométrie est grande plus la taux de perte de chaleur est élevé.

Chapitre II : Géométrie du modèle et formulation mathématique

La loi de Fourier s'exprime comme suit :

$$\varphi = -\lambda \cdot S \cdot \frac{dT}{dx} \quad (\text{II-1})$$

Φ : représente le flux de chaleur diffusé par conduction (w)

λ : Conductivité thermique du milieu qui fournit une indication sur le taux de transfert de l'énergie par diffusion (w/m*K) ou (kcal/h*m*°C)

$\frac{dT}{dx}$: Gradient de température le long de x (K/m) ou (°C/m)

S : Surface de passage du flux de chaleur, S est perpendiculaire au flux de chaleur (m²)

(-) : Signifie que le flux de chaleur progresse dans le sens opposé au gradient de température, c'est-à-dire, des températures les plus élevées vers les températures les plus basses (ce qui est du bon sens physique).[28-31]

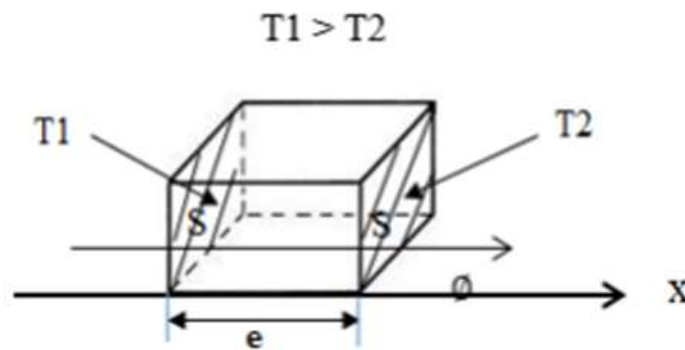


Figure II-1 : Transfert thermique par conduction [29].

II.1.2.1.1 Conductivité thermique :

C'est une particularité physique des matériaux qui fournit une indication sur le taux de transfert de l'énergie par diffusion. Elle dépend de la structure physique de la matière au niveau atomique et moléculaire et donc de l'état de la matière. La conductivité d'un solide est en général supérieure à celle d'un liquide qui est elle-même supérieure à celle d'un gaz, caractérisée par son symbole λ . [30]

II.1.2.1.2 Diffusivité thermique :

Chapitre II : Géométrie du modèle et formulation mathématique

La diffusivité thermique α est une grandeur importante pour l'étude en régime transitoire (instationnaire). Elle mesure la capacité d'un matériau à répondre plus ou moins rapidement à un changement d'environnement thermique. Son expression est la suivante :

$$\alpha = \frac{\lambda}{\rho.Cp} \quad \text{En m}^2/\text{s} \quad [30] \quad (\text{II-2})$$

II.1.2.1.3 Nombres adimensionnels de la conduction :

Deux nombres adimensionnels sont important afin d'étudier le transfert de chaleur par conduction

➤ Nombre de Biot :

Le nombre de Biot est le rapport entre la résistance interne de la conduction sur la résistance externe de la convection.

- **Résistance de conduction :**

$$R = \frac{e}{\lambda.S} \quad (\text{II-3})$$

- **Résistance de convection :**

$$R = \frac{1}{h.S} \quad (\text{II-4})$$

- **Nombre de Biot :**

$$Bi = \frac{\frac{L_c}{\lambda.S}}{\frac{1}{h.S}} = \frac{h.L_c}{\lambda}$$

$$Bi = \frac{h.L_c}{\lambda} \quad \text{II} \quad (\text{II-5})$$

- Bi : Nombre de Biot
- h : Coefficient de transfert de chaleur par convection
- λ : Conductivité thermique du corps
- L_c : Longueur caractéristique du corps (demi-épaisseur pour une plaque, demi-rayon pour un cylindre, tiers de rayon pour une sphère). [29]

Chapitre II : Géométrie du modèle et formulation mathématique

➤ Nombre de fourrier :

Est un nombre calculé en régime transitoire afin de définir la part du flux de chaleur qui pénètre dans le corps à un temps «t» par rapport à la chaleur déjà stockée dans le corps. En d'autres termes c'est la vitesse de transfert et la vitesse de stockage de chaleur.

$$Fo = \frac{\alpha.t}{L_c^2} \quad (\text{II-6})$$

- Fo : Nombre de Fourier
- α : Diffusivité thermique (m^2/s)
- t : Temps (s)
- L_c : Longueur caractéristique (m)

II.1.2.2 Convection :

La convection est le mode qui se rapporte à un transfert de chaleur consécutif à un transport macroscopique de masse qui a lieu dans des fluides ajouté à la conduction qui est toujours présente dans la matière même à une échelle microscopique, plus le mouvement du fluide est rapide, plus le transfert de chaleur par convection est meilleur.

La présence d'un mouvement massif du fluide améliore le transfert de chaleur entre la surface solide et le fluide, mais cela complique également la détermination du taux de transfert de chaleur. [28-31]

II.1.2.2.1 Convection naturelle :

Elle se produit lorsque le mouvement du fluide est uniquement dû à la poussée d'Archimède, un mécanisme dans lequel le fluide en mouvement est généré uniquement entre les particules chaudes et froides ayant différentes densités existant dans un fluide en interne, situé dans un champ de forces massique. [29, 31]

II.1.2.2.2 Convection forcée :

L'intensité du transfert de mouvement du fluide est liée directement à son régime de mouvement, cette convection est généralement accompagnée par la convection libre et la force d'Archimède est négligeable, le flux de chaleur convectif est caractérisé par certains paramètres comme la différence de température entre la paroi et le fluide, la vitesse du fluide et la surface d'échange.

Il est représenté par la loi de Newton :

Chapitre II : Géométrie du modèle et formulation mathématique

$$\varphi = h.S.(T_p - T_\infty) \quad (\text{II-7})$$

- Φ : Flux de chaleur transmis par convection (w)
- h : Coefficient de transfert de chaleur par convection (w /m*K) :
- T_p : Température de surface du solide (K) ou (°C)
- T_∞ : Température du fluide loin de la surface du solide (K) ou (°C)
- S : Surface de contact solide /fluide (m²).[29, 31]

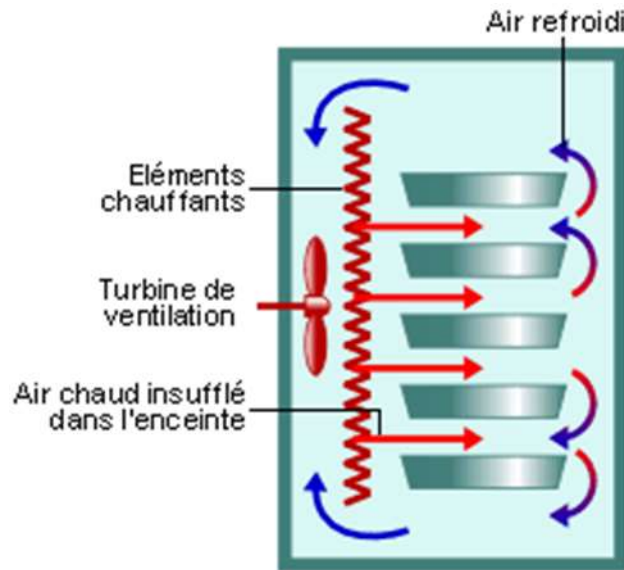


Figure II-2 : Schéma de la convection forcée [32]

II.1.2.2.3 Coefficient de convection :

Coefficient de convection h sert à quantifier le transfert de chaleur, il dépend de plusieurs paramètres : la nature d'écoulement du fluide, sa vitesse d'écoulement, sa conductivité thermique et sa viscosité cinématique, sa masse volumique, sa chaleur spécifique C_p . [30]

II.1.2.2.4 Nombres adimensionnels :

➤ Nombre de Reynolds :

Le passage d'un régime à un autre (laminaire ou turbulent) est défini par le nombre de Reynolds qui est le rapport entre les forces d'inertie et les forces visqueuses :

$$Re = \frac{V.D}{\nu} = \frac{\rho.V.D}{\mu} \quad (\text{II-8})$$

- ρ : Masse volumique du fluide (Kg/m³)
- V : Vitesse moyenne du fluide (m/s)

Chapitre II : Géométrie du modèle et formulation mathématique

- μ : Viscosité dynamique du fluide (kg/m.s)
- ν : Viscosité cinématique du fluide (m²/s)
- D : Diamètre de la conduite (m).[29]

➤ Nombre de Nusselt :

Il permet de déterminer l'importance de la convection par rapport à la conduction.

$$Nu = \frac{h.L}{\lambda} \quad (\text{II-9})$$

- h : Coefficient de transfert convectif (w /m².K)
- L : Longueur caractéristique d'échange (m)
- λ : Conductivité thermique du fluide (w/m.K)[29]

➤ Le nombre de Grashof :

Est un nombre adimensionnel qui caractérise la force de viscosité du fluide.

$$Gr = \frac{g.\beta.L^3.\Delta T}{\nu^2} = \frac{g.\beta.L^3.\Delta T.\rho^2}{\mu^2} \quad (\text{II-10})$$

- g : Accélération de la pesanteur (m/s).
- β : Coefficient de dilatation du fluide.
- ΔT : Différence de température (K).
- L : Longueur caractéristique, peut être le diamètre de la conduite ou une surface plane.
- ρ : Masse volumique de fluide (kg/m³).
- ν : Viscosité cinématique (m²/s).
- μ : Viscosité dynamique du fluide (kg/m.s).[29]

➤ Nombre de Prandtl :

Il détermine le rapport entre diffusivité de la quantité de mouvement (viscosité cinématique) et la diffusivité thermique.

$$Pr = \frac{\nu}{\alpha} = \frac{\mu}{\rho \frac{\lambda}{\rho.Cp}} = \frac{\mu.Cp}{\lambda} \quad (\text{II-11})$$

ν : Viscosité cinématique (m²/s)

Chapitre II : Géométrie du modèle et formulation mathématique

μ : Viscosité dynamique du fluide (kg/m. s)

ρ : Masse volumique de fluide (kg/m³)

α : Diffusivité thermique (m² /s)

C_p : Capacité calorifique à pression constante (en J/ kg. K).[29]

➤ Nombre de Rayleigh :

Il apparait en convection naturelle. La transition du régime laminaire au régime transitaire dépend de l'importance relative des forces d'Archimède et de viscosité. Dans un champ de pesanteur, il s'exprime de la manière suivante : [29]

$$Ra = Gr.Pr = \frac{g.\beta.(T_s - T_\infty).L^3}{\nu.\alpha} \quad (\text{II-12})$$

II.1.2.3 Rayonnement :

Est une énergie transmise par une substance à une température finie, quel que soit l'état physique du corps ce mode de transfert de chaleur est présent, suite aux changements dans les configurations électroniques des atomes ou molécules. Contrairement à la conduction et à la convection, le transfert de chaleur par le rayonnement ne nécessite pas la présence d'un milieu intermédiaire. En fait, la chaleur transférée par rayonnement est la plus rapide (elle se produit à la vitesse de la lumière) et ne subit aucune atténuation dans le vide. C'est ainsi que l'énergie du soleil atteint la terre.

L'équation de Stefan Boltzmann qui représente le rayonnement :

$$\phi = \sigma \times S \times \varepsilon \times (T_p^4 - T_\infty^4) \quad (\text{II-13})$$

ϕ : Flux de chaleur transmis par rayonnement (W)

σ : Constante de Stefan égale à $5.67 \cdot 10^{-8}$ (w/m².K⁻⁴)

S : Surface du corps (m²)

ε : Émissivité du corps ($0 < \varepsilon < 1$).

$$\varepsilon = \frac{\text{flux de chaleur du corps réel}}{\text{flux de chaleur du corps noir}} \quad (\text{II-14})$$

T_p : Température de la paroi (K)

T_∞ : Température du milieu environnant (K).[28-31]

Chapitre II : Géométrie du modèle et formulation mathématique

Remarque : si le corps est un corps noir (c'est-à-dire un corps qui absorbe toutes les radiations qu'il reçoit indépendamment de son épaisseur, de sa température et de l'angle incident), son émissivité $\varepsilon = 1$ et son flux de chaleur devient le pouvoir émissif du corps :

$$\varphi = \sigma.S.T^4 \quad (\text{II-15})$$

II.1.2.3.1 Loi de Wien :

Elle s'obtient en différenciant la distribution de Planck par rapport à λ . Elle donne la longueur d'onde pour laquelle le rayonnement émis est maximum.

$$\lambda_{\max}.T = 2898 \quad (\text{II-16})$$

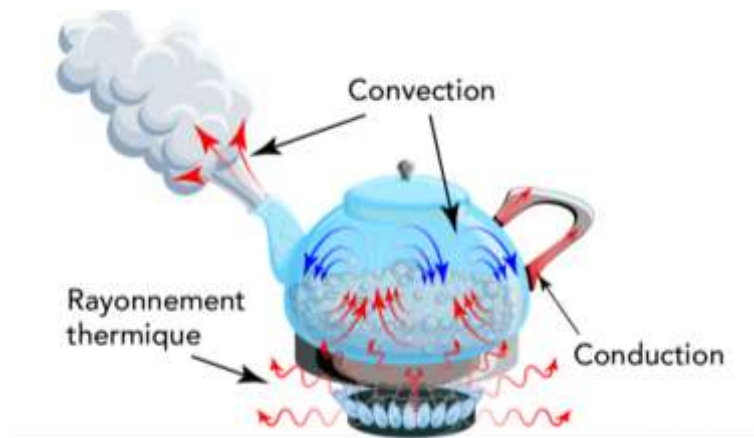


Figure II-3 : Modes de transfert [33]

II.1.2.3.2 Nombre adimensionnel :

Une onde électromagnétique est caractérisée par sa fréquence ν et sa longueur d'onde λ reliée par.

$$\nu = \frac{C}{\lambda} \quad (\text{II-17})$$

- C : Vitesse de la lumière (m/s)
- λ : Longueur d'onde (m)
- Le flux d'énergie est autant plus grand que la fréquence est élevée et la longueur d'onde faible
- Divers rayonnements électromagnétiques classés selon leur longueur d'ondes sont regroupés dans le tableau ci-dessus : [29]

Chapitre II : Géométrie du modèle et formulation mathématique

Tableau II-1 : Longueur d'onde de divers rayonnements

Nature de radiation	Longueur d'onde (λ)
Rayon gamma (γ)	<10 pm
Rayon X	100 pm-10 nm
Ultra-violet UV	10 nm-1 μ m
Visible	390 nm-740 μ m
Infrarouge IR	1 μ m-100 μ m
Micro-ondes	1cm-1m
Onde-radio	1m-100m

II.2 Généralités sur les écoulements des fluides :

II.2.1 Définition d'un fluide :

Une matière en phase liquide ou gazeuse est appelée fluide la distinction entre un solide et un fluide se fait en fonction de la capacité de la substance pour résister à une contrainte de cisaillement (ou tangentielle) appliquée qui tend à modifier sa forme. Un solide peut résister à une contrainte de cisaillement appliquée en se déformant, alors qu'un fluide se déforme continuellement sous l'influence d'une contrainte de cisaillement. Dans les solides, la contrainte est proportionnelle à la déformation, mais dans les fluides, la contrainte est proportionnelle à la vitesse de déformation. Lorsqu'une force de cisaillement constante est appliquée, un solide finit par cesser de se déformer à un certain angle de déformation fixe, alors qu'un fluide ne cesse de se déformer et s'approche d'un taux de déformation constant.[34]

II.2.2 Classification des écoulements des fluides :

La mécanique des fluides est une science qui traite le comportement des fluides au repos ou en mouvement, il existe une grande variété de problèmes d'écoulement de fluide en pratique et afin de pouvoir faire des études il faut se baser sur plusieurs caractéristiques :

- Domaine visqueux ou fluide d'un écoulement

- Ecoulement interne ou externe.
- Ecoulement compressible ou incompressible.
- Ecoulement laminaire ou turbulent.
- Ecoulement naturel ou forcé. [34]

II.3 Equations de base :

Les formes différentielles des principes de conservation de la masse, de la quantité de mouvement et de l'énergie sont exprimées à l'aide des équations aux dérivées partielles qui décrivent les variations locales de ces grandeurs dans l'espace et le temps. Voici les équations différentielles correspondantes à chacun de ces principes :

II.3.1 Equation de conservation quantité de mouvement :

La conservation de la quantité de mouvement est décrite par les équations de Navier-Stokes en mécanique des fluides. Pour un fluide newtonien incompressible, l'équation de Navier-Stokes est :

$$\rho\left(\frac{\partial V}{\partial t} + V \cdot \nabla V\right) = -\nabla P + \mu \nabla^2 V + f \quad (\text{II-18})$$

- V : vitesse d'écoulement du fluide
- ∇ : opérateur Laplacien
- ρ : masse volumique du fluide
- μ : la viscosité dynamique du fluide. [35]

II.3.2 Equation de continuité :

L'équation de continuité peut être définie comme une représentation mathématique qui indique que l'entrée de fluide dans un système est égale à l'écoulement sortant, en supposant qu'il n'y a pas d'accumulation ou de perte dans le système.

L'équation est représentée comme suit :

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho V) = 0 \quad (\text{II-19})$$

- ρ : masse volumique du fluide
- V : la vitesse d'écoulement du fluide
- ∇ : opérateur Laplacien [35]

II.3.3 Equation de conservation d'énergie :

La conservation de l'énergie peut être exprimée sous forme différentielle par l'équation de l'énergie pour un fluide, qui prend en compte l'énergie interne, cinétique et potentielle.

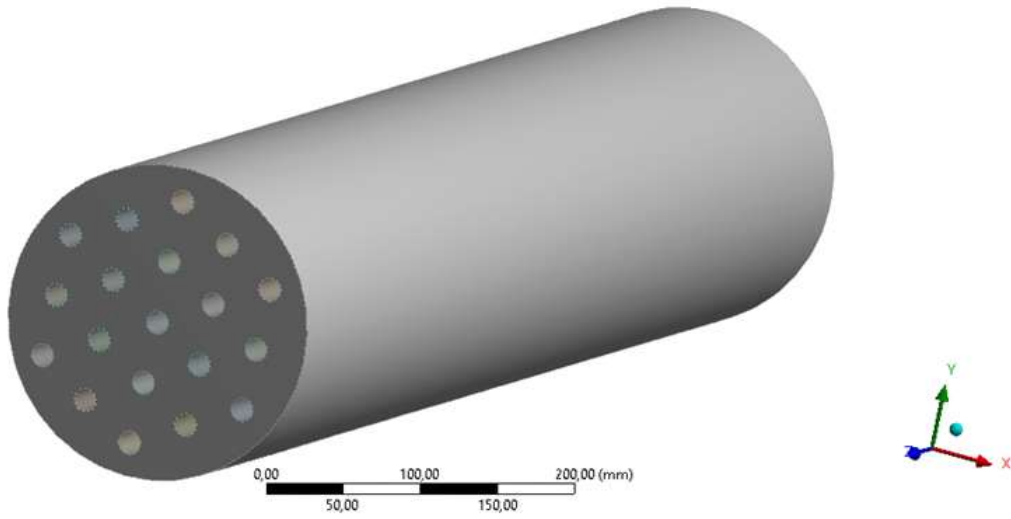
$$\frac{\partial(\rho e)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho e V) = -\nabla \cdot q + V \cdot (\nabla \cdot \sigma) + \rho f V$$

Si on néglige les forces de gravité

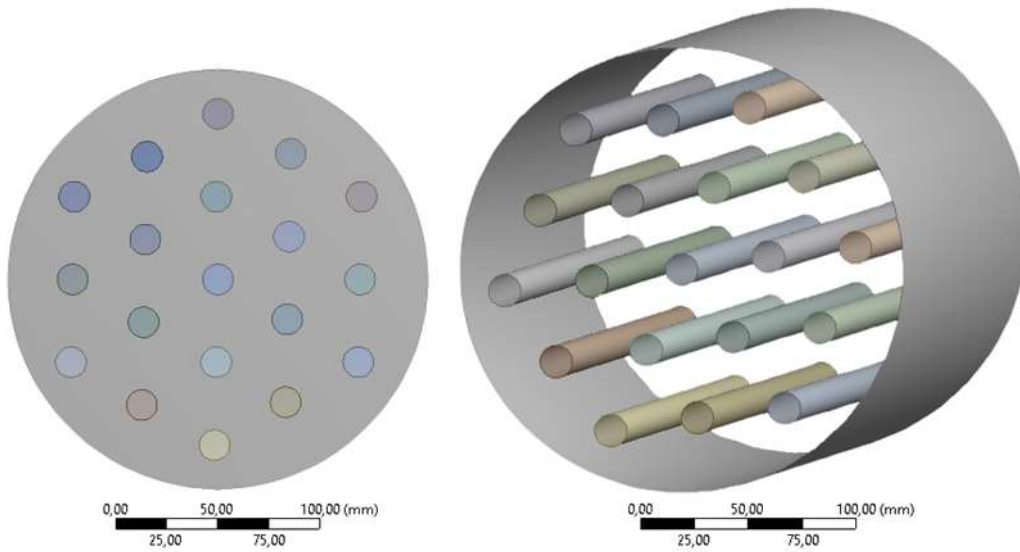
$$\frac{\partial(\rho e)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho e V) = -\nabla \cdot q + V \cdot (\nabla \cdot \sigma) \quad (\text{II-20})$$

- ρ : masse volumique du fluide
- V : vitesse d'écoulement du fluide
- e : l'énergie totale par unité de masse (souvent décomposée en énergie interne, cinétique et potentielle).
- f : le vecteur de forces volumiques.
- q : le flux de chaleur (souvent exprimé comme $q = -k \nabla T$ avec k étant la conductivité thermique et T la température).[35]

II.4 Géométrie du modèle :



Vue isométrique



Vue de face

Vue de l'intérieur

Chapitre II : Géométrie du modèle et formulation mathématique

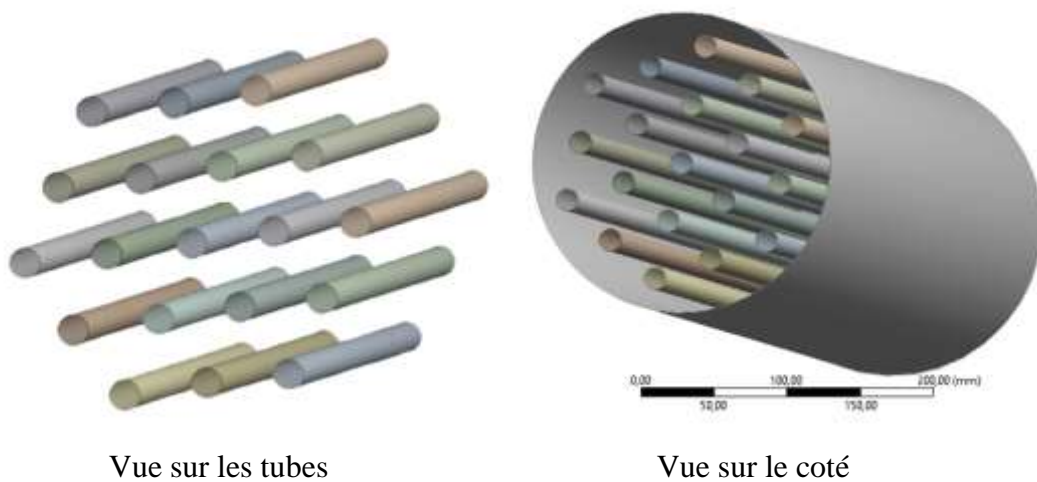
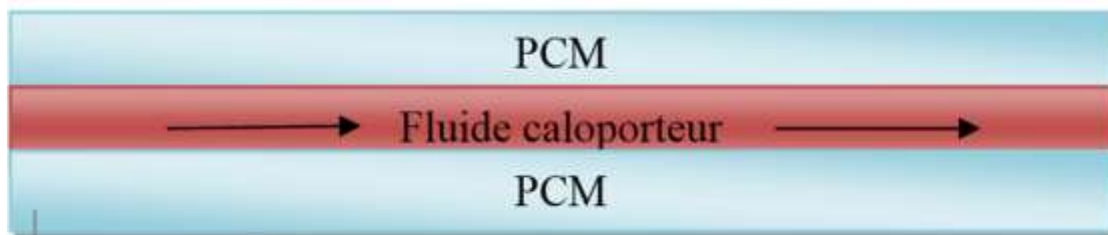


Figure II-4 Différentes vues sur la géométrie du modèle



Les figures ci-dessus représentent les différentes faces du modèle de géométrie du système de stockage étudié, ce système est alimenté par un concentrateur cylindro-parabolique, le modèle a été dessiné par le logiciel DesignModeler (plus de détails dans le chapitre suivant), pour aboutir à cette topologie un cercle de 206 mm a été dessiné et extrudé d'une profondeur de 1000mm, ce cylindre a été rempli intérieurement de 19 cercles de 15 mm de diamètre eux même extrudés de la même profondeur pour créer des tubes cylindriques, tout en calculant la distance entre ces derniers pour qu'elle soit la même, cette distance est égale à 40.6mm, les tubes sont en cuivre.

Chapitre III

Méthode de résolution numérique

III.1 Généralités sur le logiciel de simulation

III.1.1 Description du code de calcul fluent :

Fluent est un code de simulation numérique conçu pour résoudre des problèmes complexes liés au transfert de chaleur, de masse et de quantité de mouvement dans des géométries bidimensionnelles et tridimensionnelles complexes, valables pour les écoulements stationnaires ou instationnaire, laminaires, ou turbulents. Il est largement utilisé pour des applications industrielles dans de divers domaines, notamment l'étude de l'aérodynamique autour d'une aile d'avion, la combustion dans un four, les colonnes à bulles pour plates-formes pétrolières, la circulation sanguine, la fabrication des semi-conducteurs, la conception de salles blanches et les stations d'épuration. Il traite aussi les problèmes de convection naturelle, forcée, mixte et thermos capillaires, avec ou sans changement de phase. Le logiciel Fluent est basé sur la méthode de modélisation numérique connue pour sa puissance de calcul et sa facilité de mise en œuvre, *c'est la méthode des volumes finis*.

III.1.1.1 Etapes de la méthode des volumes finis :

La méthode des volumes finis s'articule autour de trois procédures principales :

- ♣ La génération du maillage.
- ♣ La discrétisation des équations de transport basées sur le principe d'intégration des équations sur un volume de contrôle.
- ♣ La résolution du système d'équations par différentes méthodes de résolution numériques directes et itératives

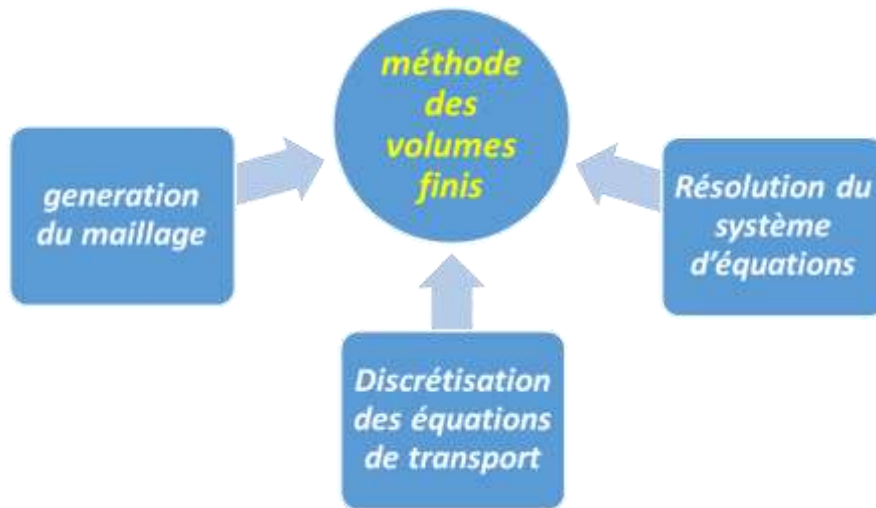


Figure III-1 : Procédure des volumes finis.

III.1.2 Etape de la simulation numérique

La simulation numérique est réalisée par le logiciel Ansys Workbench qui permet de réaliser des simulations bidimensionnelles ou tridimensionnelles des problèmes de mécanique des fluides et de transfert thermique, allant du dessin de la géométrie par DesignModeler à la résolution des équations de conservation de masse, de chaleur et de quantité de mouvement ainsi qu'au traitement des résultats obtenus avec simulation numérique sur fluent en passant par la construction du maillage sur Meshing.

III.1.2.1 Dessin sur Design Modeler :

L'application ANSYS Design Modeler est conçue pour être utilisée comme éditeur de géométrie de modèles CAO existants. L'application ANSYS Design Modeler est un modéleur solide paramétrique basé sur des fonctionnalités conçues pour que vous puissiez commencer intuitivement et rapidement à dessiner des esquisses 2D, à modéliser des pièces 3D ou à télécharger des modèles CAO 3D pour le prétraitement des analyses techniques.

L'interface de l'application ANSYS Design Modeler est similaire à celle de la plupart des autres modélisateurs basés sur les fonctionnalités.

L'interface utilisateur graphique est composée de cinq régions de base :

III.1.2.1.1 Barres d'outils :

Situées en haut de l'interface, il y a neuf barres d'outils :

➤ **Barre d'outils menu :**

Elle comprend les menus suivants :



➤ **Barre d'outils sélection :**

Elle comprend :



Cette barre est utilisée pour effectuer ces tâches :

- ♣ Présélectionnez les entités pour les fonctions d'esquisse et de modélisation.
- ♣ Sélectionnez les entités d'esquisse (courbes, points et cotes).
- ♣ Sélectionnez les sommets, les arêtes, les faces ou les corps du modèle.
- ♣ Étendre la sélection actuelle.

➤ **Barre d'outils des modes de rotation :**

Les options de la barre d'outils rotation sont :



➤ **Barre d'outils affichage :**

Contient les fenêtres suivantes :



➤ **Barre d'outils options graphiques :**

Utilisez les options graphiques pour afficher les faces et les arêtes du modèle par couleur et pour déterminer l'épaisseur et la direction des arêtes.

La barre d'outils présente, de gauche à droite :



➤ **Barre d'outils Plan/Esquisse actif :**

Utilisez la barre d'outils Plan actif/Esquisse pour créer un nouveau plan ou une nouvelle esquisse. Vous pouvez également l'utiliser pour changer de plan actif ou d'esquisse active en mode d'esquisse. (En mode modélisation, cela se fait généralement via une sélection dans l'arborescence des fonctionnalités.)

La barre d'outils Plan actif/Esquisse comprend :



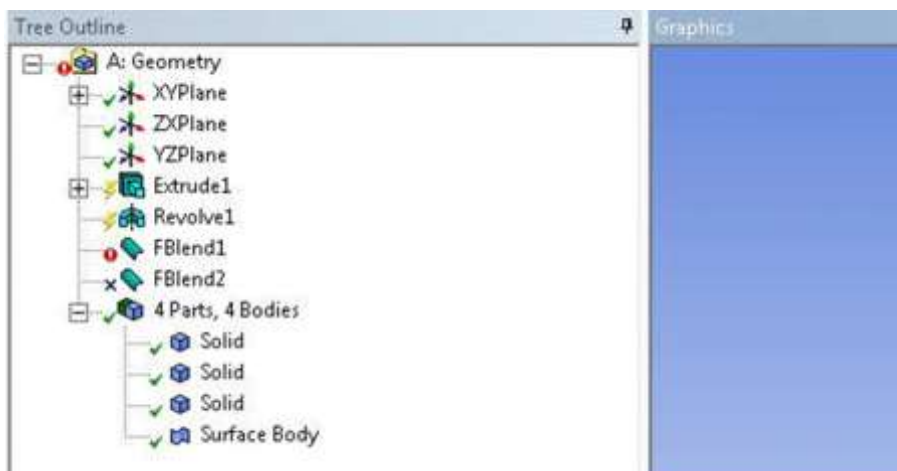
➤ **Barre d'outils des fonctionnalités :**

Utilisez les options affichées dans la barre d'outils Fonctionnalité pour créer et réviser des modèles. Les fonctionnalités 3D sont également accessibles via le menu Créer. Une fois appliquées à un modèle, les fonctionnalités sont représentées par leur nom dans le contour de l'arborescence, positionné à gauche de la fenêtre graphique.



III.1.2.1.2 Aperçu de l'arbre :

Comme illustré dans l'image ci-dessus, à côté de l'icône de chaque fonctionnalité dans l'arborescence se trouve un symbole représentant l'état de la fonctionnalité. Il existe cinq états qu'une fonctionnalité peut avoir :



✓ Fonctionnalité réussie. Désigné par une coche verte.

Chapitre III : Méthode de résolution numérique

⚡ La fonctionnalité a été mise à jour depuis la dernière génération. Désigné par un éclair jaune.

✓ La fonctionnalité a été générée, mais certains avertissements existent. Désigné par une coche jaune.

❗ La fonctionnalité n'a pas pu être générée. Désigné par un symbole d'exclamation rouge.

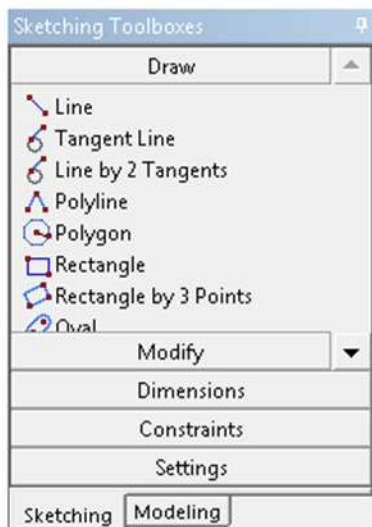
✗ La fonctionnalité est supprimée et n'a aucun effet sur le modèle. Désigné par un x bleu.

De plus, si la fonctionnalité apparaît en gris, cela signifie qu'elle est inactive. Cela peut se produire chaque fois que vous effectuez une insertion de fonctionnalité ou une modification des sélections pour les fonctionnalités et Appliquer/Annuler.

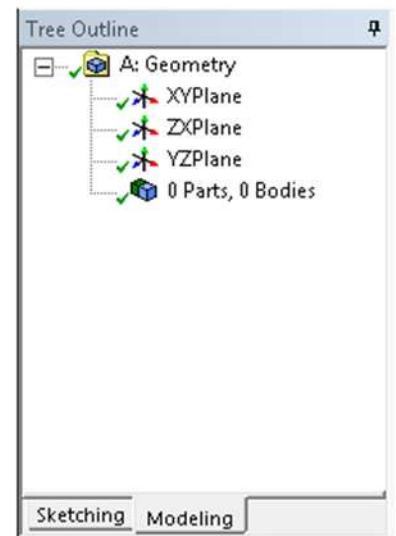
III.1.2.1.3 Aperçu de l'arborescence et boîtes à outils :

Par défaut, l'application ANSYS DesignModeler démarre en mode modélisation, ce qui signifie que le contour de l'arborescence est affiché et que l'onglet Modélisation est affiché en bas de la fenêtre Structure de l'arborescence. La sélection de l'onglet Esquisse affichera les boîtes à outils Esquisse dans la même région de l'interface. Vous pouvez modifier le mode par défaut via la catégorie Affichage dans la section Divers du panneau Options.

Onglet Esquisse



Onglet Modélisation



Le mode d'esquisse affiche cinq boîtes à outils décrites dans la section Principes fondamentaux de l'application DesignModeler. La boîte à outils Draw est affichée par défaut en mode esquisse. Pour ouvrir une autre boîte à outils, cliquez sur le nom de la boîte à outils. L'intégralité du contenu d'une boîte à outils peut être affichée en plaçant le curseur sous les

onglets Esquisse et Modélisation et le curseur vers le bas de l'interface avec le bouton gauche de la souris.

➤ **Boîte à outils Dessiner (draw)**

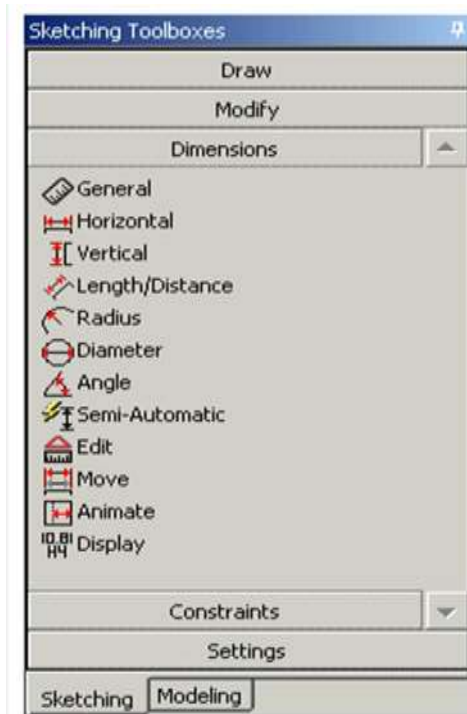
➤ **Boite à outil modifier :**

Elle contient :



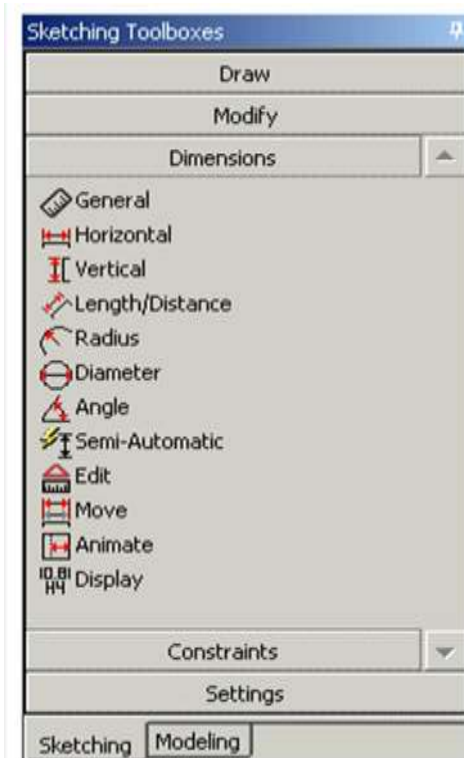
➤ **Boîte à outils Dimensions :**

Elle se compose de :



➤ **Boîte à outils contraintes :**

Utilisez la boîte à outils Contraintes pour définir des relations entre les éléments d'esquisse et les plans de référence.



➤ Boîte à outils paramètres :



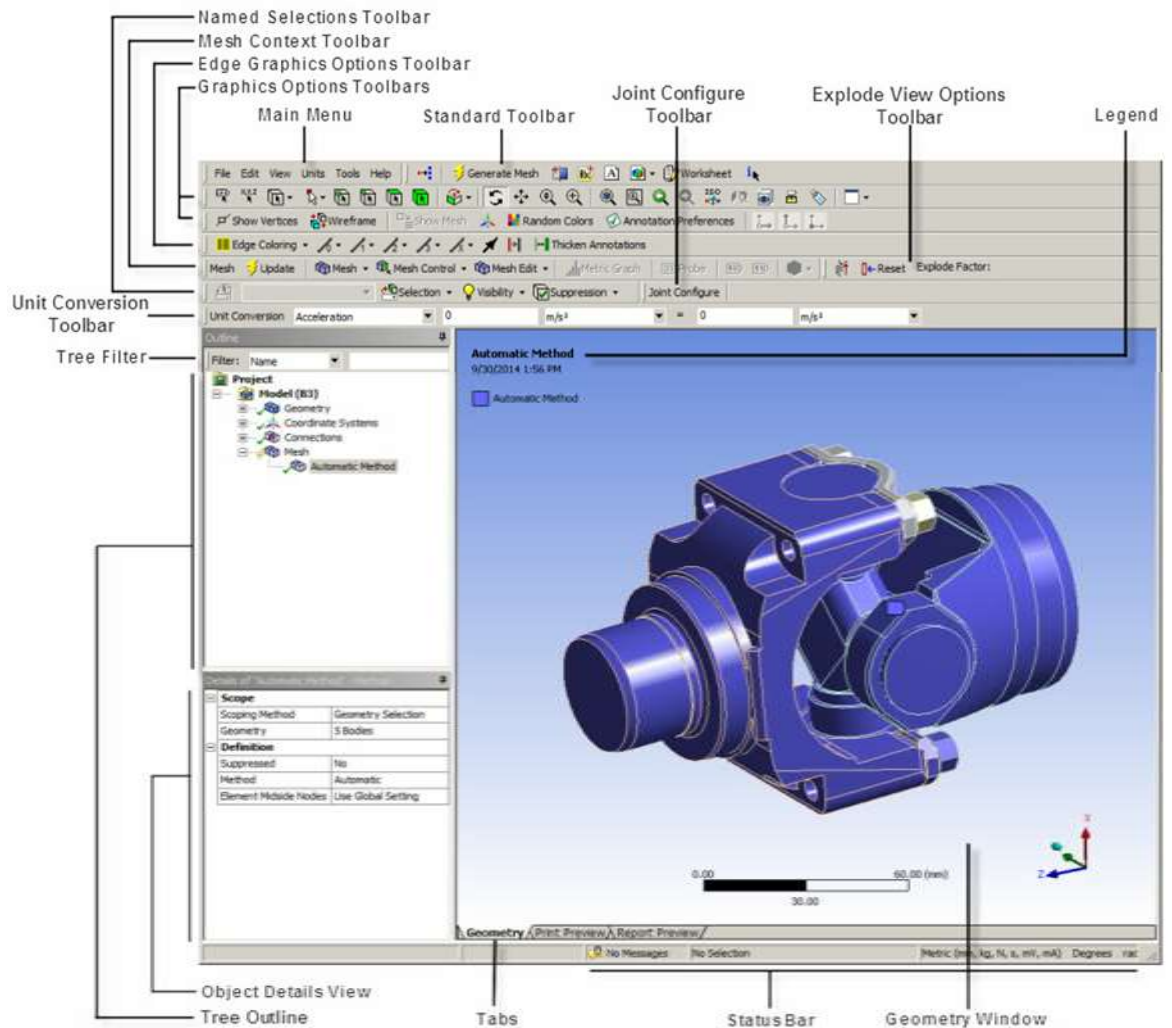
III.1.2.2 Maillage avec ANSYS Meshing :

L'application Meshing est intégrée aux données d'ANSYS Workbench, ce qui signifie que même si l'interface reste séparée, les données de l'application communiquent avec les données natives d'ANSYS Workbench. Les sujets suivants sont abordés dans cette section :

- Flux de travail d'application de maillage de base
- Stratégies de maillage CFD/fluides dans ANSYS Workbench
- Accéder à la fonctionnalité de maillage
- Présentation de l'interface de l'application de maillage
- Détermination des paramètres de physique, d'analyse et de solveur
- Travailler avec des données de maillage héritées
- Exportation de maillages ou de géométries à facettes
- Maillage CFD ANSYS ICEM étendu
- Utilisation des paramètres d'application de maillage
- Différences de maillage entre ANSYS Workbench et les applications APDL mécaniques

III.1.2.3 Description des fenêtres du logiciel :

III.1.2.3.1 Barre d'outils :



➤ **Barre de menu principal :**

Cette barre comprend les menus principaux :



➤ **Barre d'outils standard :**

Cette barre d'outils contient les commandes d'application couramment utilisées.



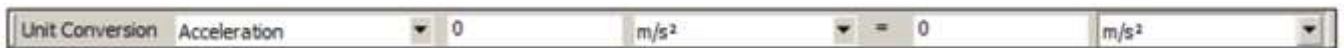
➤ Barre d'outils graphique :



➤ Barre d'outils contexte :

La barre d'outils contextuelle configure ses boutons en fonction du type d'objet sélectionné dans le plan de l'arborescence. La barre d'outils contextuelle rend un nombre limité de choix pertinents plus visibles et plus facilement accessibles.

➤ Barre d'outils de conversion d'unités



La barre d'outils Conversion d'unités est un calculateur de conversion intégré. Il permet la conversion entre des systèmes d'unités cohérents.

Le menu Unités définit le système d'unités actif. La barre d'état affiche le système d'unités actuel. Les unités répertoriées dans la barre d'outils et dans la vue Détails sont sous la forme appropriée (c'est-à-dire sans parenthèses).

La barre d'outils Conversions d'unités est masquée par défaut.

➤ Barre d'outils sélection nommée :



La barre d'outils Sélection nommée vous permet de sélectionner, d'ajouter et de supprimer des éléments des sélections nommées existantes définies par l'utilisateur, ainsi que de modifier les états de visibilité et de suppression.

➤ Barre d'outils sélection graphique :



La barre d'outils Options graphiques offre un accès rapide aux fonctionnalités utiles pour contrôler l'affichage graphique des modèles, la barre d'outils est affichée par défaut.


➤ Barre d'outils Options de la vue éclatée :



Est une fonctionnalité d'affichage graphique utilisée pour créer une distance imaginaire entre les corps géométriques (uniquement) de votre modèle à des fins de visualisation. Une fois le maillage généré, cette fonctionnalité n'est pas prise en charge lorsque l'objet Mesh est sélectionné ou lorsque la fonctionnalité Afficher le maillage est activée. De plus, lors de la visualisation du maillage, les corps géométriques éclatés, bien que non visibles dans la fenêtre graphique, sont toujours dans un état éclaté et le fait de passer le curseur sur un corps éclaté mettra en surbrillance le corps (sinon invisible) et il est également sélectionnable à ce moment.

Pour afficher la barre d'outils (ou la désactiver), sélectionnez Affichage>Barres d'outils>Options de vue éclatée.

III.1.2.3.2 Déplacer des ressorts/poutres avec des pièces

Ce bouton  garantit que vous voyez une représentation précise des connexions sur votre modèle, telles que les ressorts et les poutres, en affichant les connexions étirées à partir des emplacements attribués sur les pièces mobiles. L'affichage étant graphiquement précis, les exigences de traitement sont intensives. Utilisez la position par défaut (non active/déprimée) lorsque vous déplacez le curseur pour les grands modèles et lorsque les représentations de connexion ne sont pas critiques.

➤ **Bouton de réinitialisation**

Ce bouton réassemble les pièces de votre modèle à leur position d'origine.

• **Curseur de facteur de vue éclatée**

Cet outil curseur vous permet de modifier la distance éclatée entre les pièces par rapport à leur position d'origine.

III.1.2.3.3 Liste déroulante du Centre d'assemblage

Cette liste déroulante fournit les options de système de coordonnées disponibles ainsi que l'option Centre d'assemblage (paramètre par défaut) qui définit la position dans l'espace d'où

provient la vue éclatée et l'option Centre d'assemblage (visible) qui ne prend en compte que les pièces visibles. Le système de coordonnées global est toujours une option disponible, ainsi que tout système de coordonnées défini par l'utilisateur.

III.1.2.3.4 Contour de l'arbre :

Le contour de l'arborescence des objets correspond à la séquence logique des étapes de simulation. Les sous-branches d'objet se rapportent à l'objet principal. Par exemple, un objet d'environnement d'analyse, tel que Statique Structural, contient des charges. Vous pouvez cliquer avec le bouton droit sur un objet pour ouvrir un menu contextuel relatif à cet objet. Une variété d'options sont disponibles dans le menu contextuel et les options varient en fonction de l'objet sélectionné, mais des sélections courantes sont généralement présentées, telles que la possibilité de renommer un objet. Vous pouvez renommer des objets individuellement à l'aide de l'option Renommer lorsqu'un seul objet est sélectionné ou vous pouvez sélectionner plusieurs objets et utiliser l'option Renommer tout. L'option Renommer tout vous permet de renommer les objets avec des numéros séquentiels ajoutés au nom ou vous pouvez simplement les renommer tous du même nom.

III.1.2.4 Maillage :

Le maillage est l'opération de partager le domaine étudié ou la géométrie construite qui décrit le problème à résoudre, en sous domaines infiniment petit dont la forme et le nombre sont imposés par la nature du cas traité. Les caractéristiques dynamiques et thermiques des grandeurs physiques moyennes et fluctuantes de l'écoulement produit par ce type d'interaction sont discrétisées sur des cellules qui forment le maillage de la configuration par le logiciel.

III.1.2.5 Types du maillage :

Le critère qui s'impose pour l'obtention d'un bon maillage est le choix d'un type meilleur qui sert à décrire la géométrie avec la moindre erreur. Pour cela, on cite les trois types de maillage existants :

III.1.2.5.1 Maillage structuré (quadra/hexa) :

Il est beaucoup plus facile de le générer en utilisant une géométrie à multi bloc, il présente des avantages qui sont les suivants :

Chapitre III : Méthode de résolution numérique

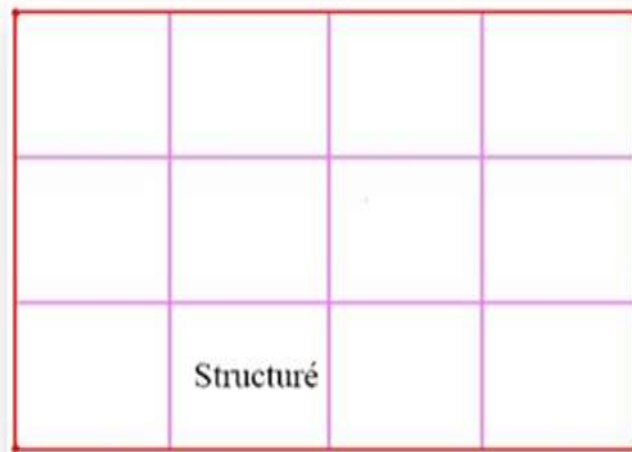
■ Il est économique en nombre d'éléments, il présente un nombre inférieur de maille par rapport à un maillage non structuré équivalent.

■ Il réduit les risques d'erreurs numériques car l'écoulement est aligné avec le maillage.

Il présente aussi des inconvénients qui sont comme suit :

■ Il est difficile à générer dans le cas des géométries complexes.

■ Il aussi difficile d'obtenir une bonne qualité de maillage pour certaines géométries complexes.



III.1.2.5.2 Maillage non structuré

Les éléments sont générés de manière arbitraire, sans aucune contrainte de disposition.

Ses avantages sont :

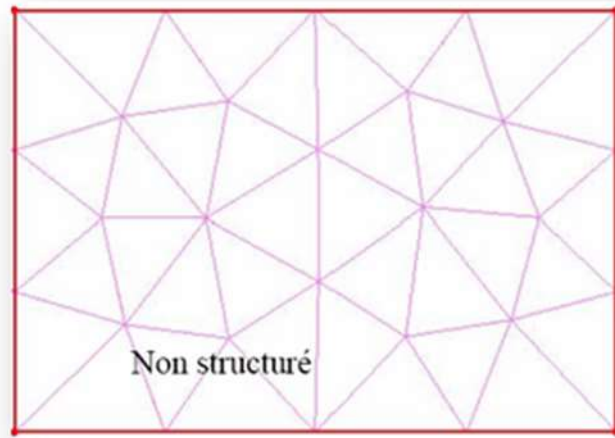
■ Il peut être généré sur une géométrie complexe tout en gardant une bonne qualité des éléments.

■ Les algorithmes de génération de ce type de maillage sont très automatisés.

Par contre ses inconvénients sont :

■ Il est très gourmand en nombre de mailles en comparant avec le maillage structuré.

■ Il engendre des erreurs numériques (fausse diffusion) qui peuvent être plus importante si l'on compare avec le maillage structuré.



III.1.2.5.3 Maillage hybride

C'est un maillage généré par un mélange d'éléments de différents types, triangulaires ou quadrilatéraux en bidimensionnel (2D), tétraédriques, prismatiques, ou pyramidaux en tridimensionnel (3D). Il combine entre les avantages du maillage structuré et ceux du maillage non structuré

Les différentes formes de cellules de maillages sont données dans le tableau ci-dessous :

Option	Description
Quad	Indique que le maillage est sous forme de mailles quadrilatérales.
Tri	Indique que le maillage est sous forme de mailles triangulaires.
Quad/Tri	Indique que la maille est mixte, c'est-à-dire il se compose principalement de quadrilatères mais inclut les éléments triangulaires dans certains endroits préalablement choisis par l'utilisateur (exemple dans les coins d'une configuration).

III.1.2.6 Qualité du maillage :

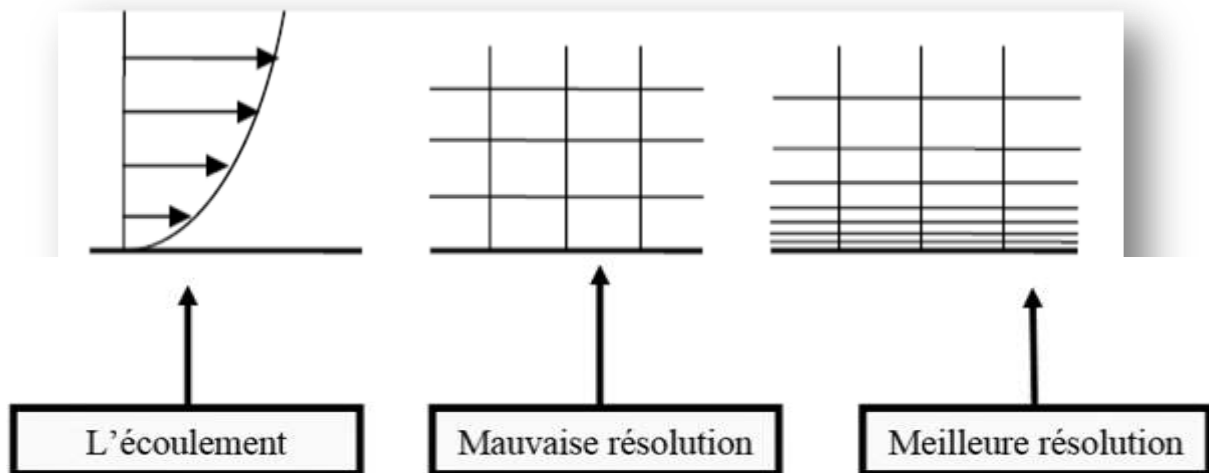
Une bonne qualité de maillage repose sur les procédures suivantes :

- Minimisation des éléments présentant des distorsions car la bonne qualité du maillage est synonyme d'absence des distorsions d'éléments.
- Une bonne résolution dans les régions présentant un fort gradient (couches limites, ondes de choc,...etc.)

La qualité du maillage a un impact sérieux sur la convergence, la précision de la solution et surtout sur le temps de calcul.

Le raffinement du maillage est nécessaire, il se fait sous Fluent en adaptant la grille de maillage à l'écoulement en intervenant particulièrement sur :

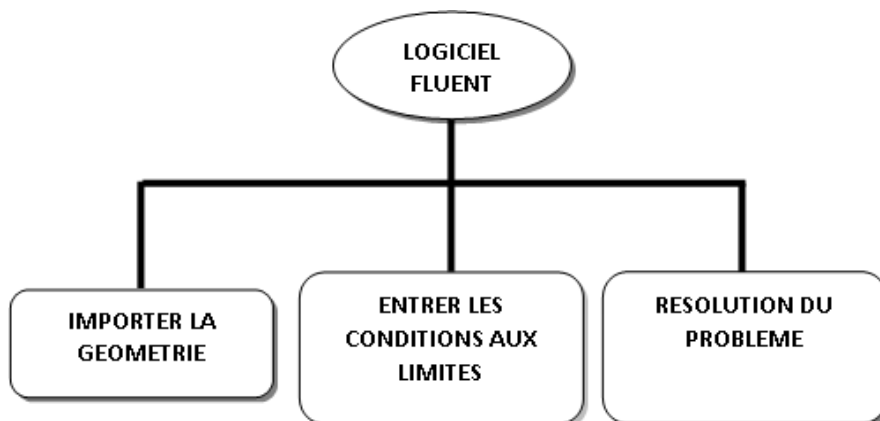
- Les zones à fort gradient.
- Les zones définissant les frontières des volumes fluides.
- A l'intérieur de certaines zones.



III.1.3 Configuration, Solution et Résultats sur Fluent :

III.1.3.1 Définition de fluent :

Le logiciel Fluent est un code de calcul CFD (Computational Fluid Dynamics) basé sur la technique des volumes finis est capable de simuler les problèmes des écoulements des fluides donc il a le pouvoir de résoudre les équations associées, Il est utilisé pour modéliser ces écoulements et leurs transferts thermiques, dans et autour des géométries complexes.



Chapitre III : Méthode de résolution numérique

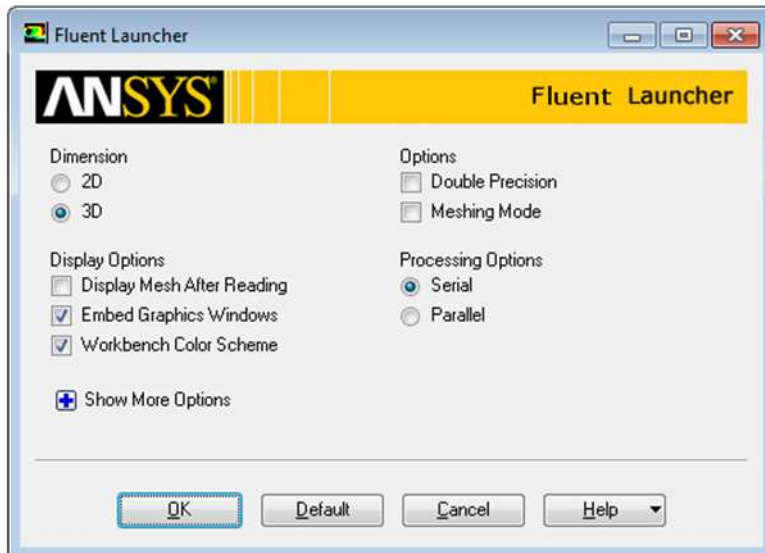
Fluent peut modéliser les phénomènes suivants :

- Écoulement dans des géométries 2D ou 3D en utilisant des maillages adaptatifs non structurés
- Écoulement incompressible ou compressible
- Analyse stationnaire ou instationnaire
- Écoulement non-visqueux, laminaire ou turbulent
- Écoulement Newtonien ou non-Newtonien
- Transferts de chaleur par convection, naturelle ou forcée
- Transfert de chaleur couplé conduction/convection
- Transfert de chaleur par rayonnement
- Repère de référence inertielle (stationnaire) or non-inertielle (en rotation)
- Multiples repères de référence en mouvement, incluant des interfaces glissantes et des plans de mélange
- Mélange et réaction d'espèces chimiques, incluant des modèles de combustion et des réactions de surface
- Source volumique arbitraires de chaleur, masse, quantité de mouvement, turbulence, et espèces chimiques
- Calculs de trajectoires Lagrangiennes pour une phase dispersée de particules/gouttes/bulles, incluant le couplage avec la phase continue
- Écoulement à travers les matériaux poreux
- Modèles pour turbine 1D/échangeur de chaleur
- Écoulements diphasique, incluant la cavitation.
- Écoulements à surface libre avec surfaces complexes.

III.1.3.2 Démarrage d'Ansys :

Vous pouvez spécifier de manière interactive les dimensions, l'affichage, le traitement et d'autres options d'ANSYS Fluent à l'aide du Fluent Launcher.

Toutes les options définies dans Fluent Launcher seront conservées pour votre prochaine session.



- Spécifiez la dimension de la simulation que vous souhaitez effectuer.
- Sélectionnez vos options d'affichage requises.
- Choisissez d'intégrer des fenêtres graphiques (par défaut) ou d'avoir des fenêtres graphiques flottantes.
- Choisissez soit le schéma de couleurs Workbench par défaut (arrière-plan dégradé bleu) soit un arrière-plan noir classique pour les fenêtres graphiques.
- Sélectionnez vos options requises.
- Choisissez d'effectuer des calculs de solution en mode Double Précision, si vous le souhaitez. (Le mode par défaut est le mode simple précision.) Consultez Solveurs simple précision et double précision pour vous aider dans votre décision.
- Choisissez de démarrer ANSYS Fluent en mode maillage, si vous le souhaitez. (La valeur par défaut est le mode Solution.)

III.1.3.3 Interface d'Ansys Fluent :

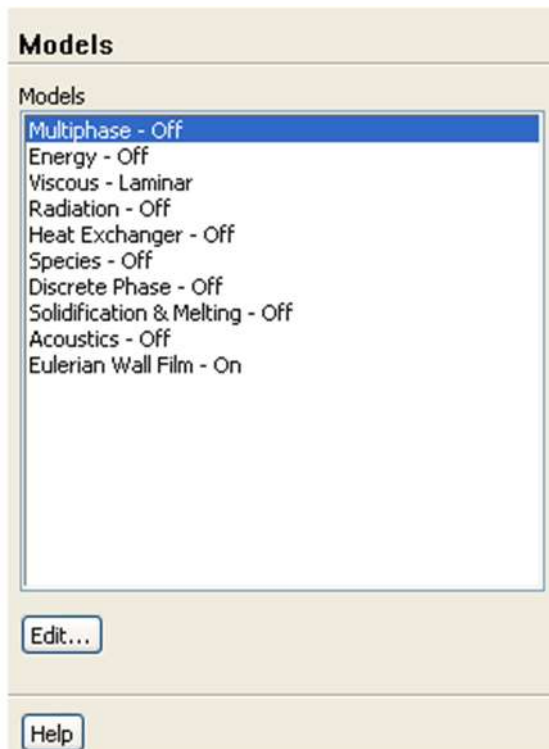
III.1.3.3.1 Page des tâches générales :

La page des tâches Général vous permet de définir divers paramètres de problèmes génériques, tels que ceux liés au maillage ou au solveur.



III.1.3.3.2 Page des tâches des modèles

La page de tâches Modèles vous permet de définir divers paramètres de modèle générique.



III.1.3.3.3 Page des tâches relatives aux matériaux

La page de tâches Matériaux vous permet de définir les propriétés de tout matériau fluide ou solide (ou mélange, le cas échéant) dans votre simulation ANSYS Fluent.



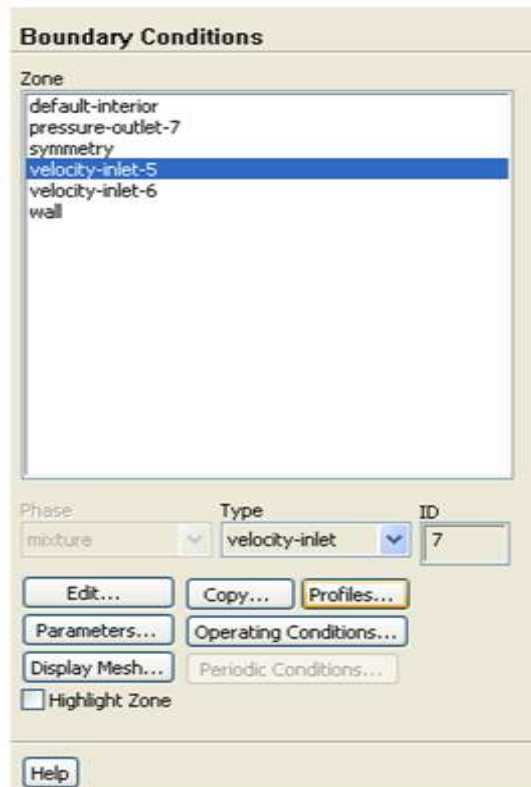
III.1.3.3.4 Page de tâches Conditions de zone de cellule :

La page de tâches Conditions des zones de cellule vous permet de définir le type d'une zone de cellule et d'afficher d'autres boîtes de dialogue pour définir les paramètres de condition de zone de cellule pour chaque zone.



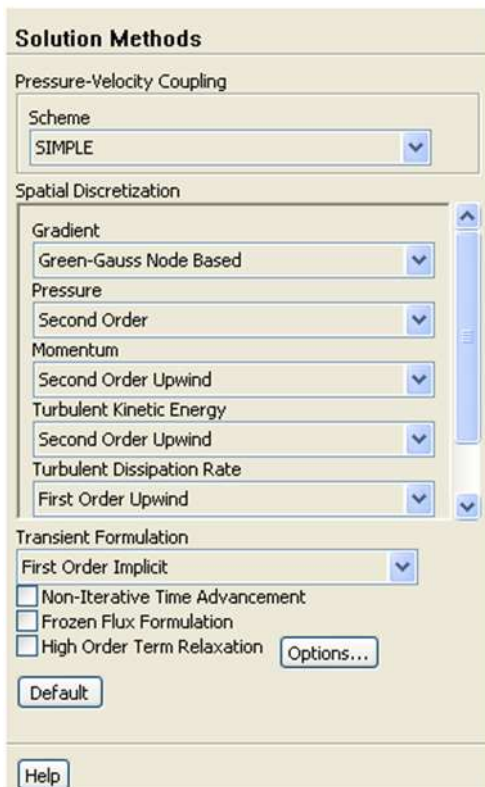
III.1.3.3.5 Page de tâches Conditions aux limites :

La page de tâches Conditions aux limites vous permet de définir le type d'une limite et d'afficher d'autres boîtes de dialogue pour définir les paramètres de condition aux limites pour chaque limite.



III.1.3.3.6 Page des tâches des méthodes de solution

La page de tâches Méthodes de solution vous permet de spécifier divers paramètres associés à la méthode de solution à utiliser dans le calcul.



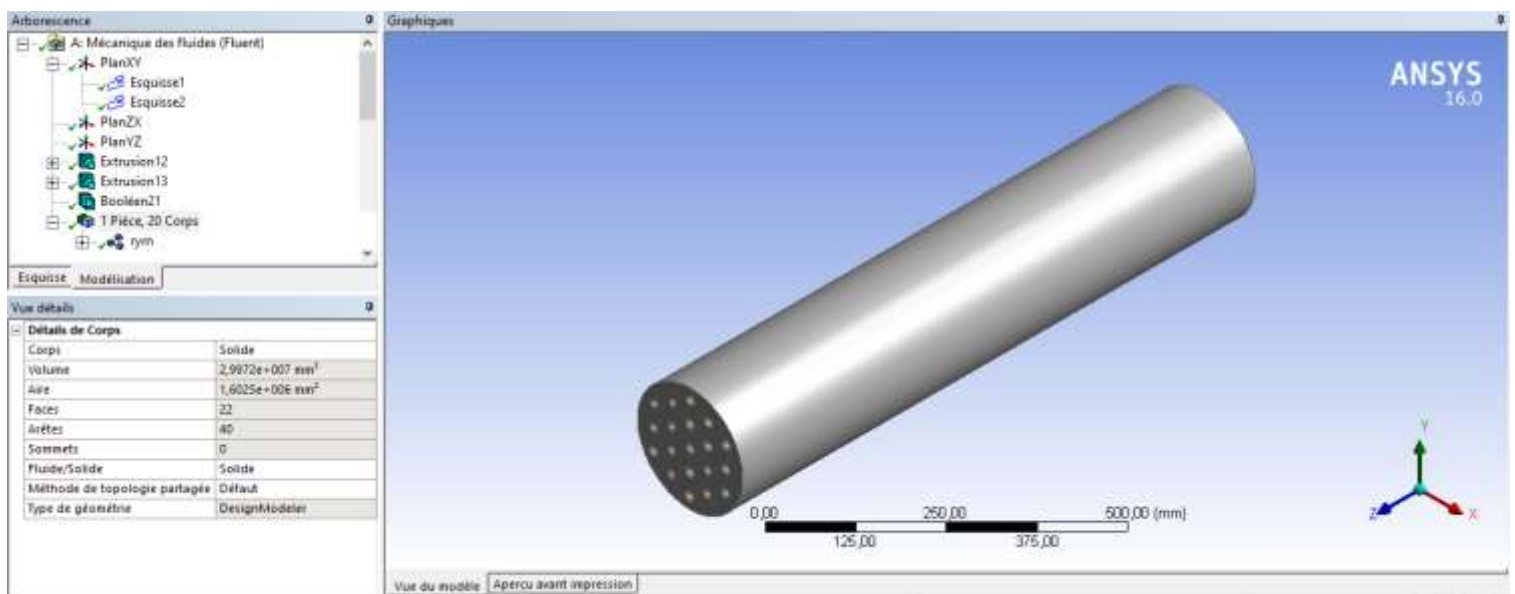
III.1.3.3.7 Page Exécuter la tâche de calcul

La page de tâche Exécuter le calcul vous permet de démarrer les itérations du solveur.



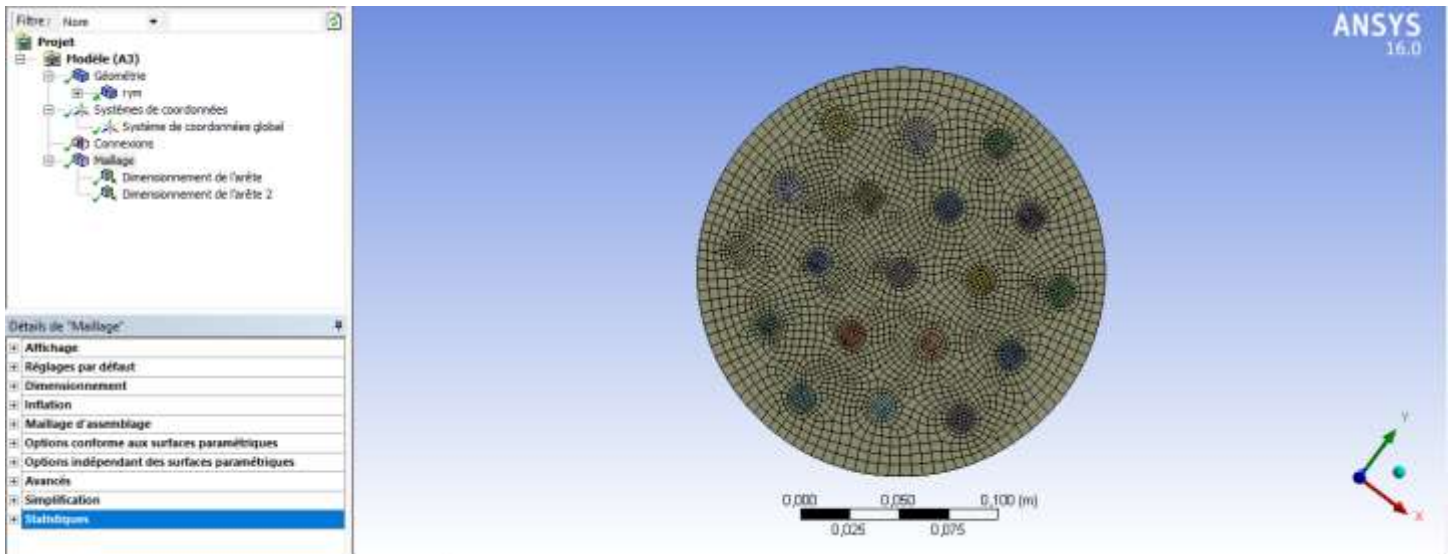
III.2 Modèle étudié :

III.2.1 DesignModeler :



Vue détails	
Détails de Corps	
Corps	Solide
Volume	2,9972e+007 mm ³
Aire	1,6025e+006 mm ²
Faces	22
Arêtes	40
Sommets	0
Fluide/Solide	Solide
Méthode de topologie partagée	Défaut
Type de géométrie	DesignModeler

III.2.2 Meshing :



III.2.3 Propriétés thermophysiques des matériaux :

Le modèle utilise l'eau comme fluide caloporteur en régime turbulent transitoire qui est soumis à une vitesse constante de 1 m/s ainsi qu'une température d'entrée et une température de sortie tout deux constantes de 350 k et 300 k respectivement, le matériau à changement de phase utilisé est la paraffine avec différentes températures d'entrée et différentes densités, la fusion est traité comme un problème tridimensionnel, les propriétés thermophysiques des MCP et du fluide caloporteur sont mentionnés dans le tableau suivant :

Tableau III-1 : Propriétés thermophysiques des matériaux

propriétés	HTF	RT30	Tétracosane C24 H50	Héptacosane C27 H56	Cuivre
Masse volumique solide (kg/m ³)	998.2	900	900	850	8978
Masse volumique liquide (kg/m ³)		780	775	775	
Température solide (k)		298	320	326	/
Température liquide (k)		303	325	331	

Chapitre III : Méthode de résolution numérique

Chaleur spécifique (kJ/kg.K)	4.182	2	2.5	2.8	0.381
Conductivité thermique (w/m.K)	0.6	0.2	0.15	0.21	387.6
Chaleur latente (kJ/kg)		180	220	240.4	
Viscosité dynamique (kg/m.s)	0.001003	0.0054	0.006	0.0054	

III.2.4 Paramètres de simulation utilisés :

Régime	turbulent
Schéma (couplage pression-vitesse)	Simple
Pas de temps (s)	0.1
Vitesse du fluide (m/s)	1
Température initiale du fluide (k)	350
Ecoulement du fluide	Unidirectionnel suivant l'axe Z
Modes de transfert de chaleur	Convection et conduction

III.2.5 Conditions aux limites

Domaine fluide

Fluide caloporteur :

A l'entrée des tubes : Pour assurer une température constante le long des tubes

$$U = 0 \quad m/s; \quad V = 0 \quad m/s.$$

$$W = 1 \quad m/s.$$

$$T = 350 \quad K.$$

Domaine PCM :

$$U = 0 \quad m/s; \quad V = 0 \quad m/s. \quad W = 0 \quad m/s.$$

$$T = 298 \quad K.$$

Domaine solide

Tubes :

On propose une température constante

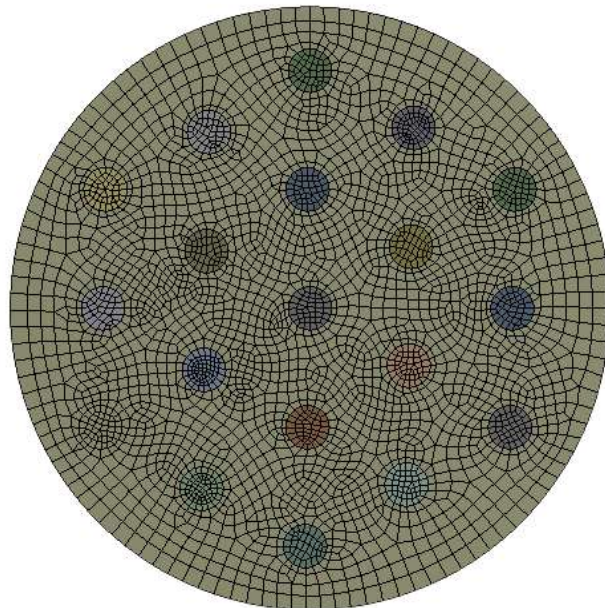
$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial T}{\partial x} \right) = \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\partial T}{\partial y} \right) = \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\partial T}{\partial z} \right) = 0$$

Paroi extérieure :

Pour assurer l'isolation dans la paroi extérieure

$$\ell = K \frac{\partial T}{\partial x} = K \frac{\partial T}{\partial y} = 0$$

III.2.6 Rapport de maillage



➤ Unités

TABLEAU 1

Système d'unités	Métrique (m, kg, N, s, V, A) Degrés rad/s Celsius
Angle	Degrés
Vitesse de rotation	rad/s
Température	Celsius

➤ Modèle (A3)

• Géométrie

TABLEAU 2 Modèle (A3) > Géométrie

Nom de l'objet	Géométrie
Etat	Défini complètement
Définition	
Source	C:\Users\User\Desktop\rym\rym_files\dp0\FFF\DM\FFF.agdb
Type	DesignModeler
Unité de longueur	Mètres
Boîte englobante	
Longueur suivant X	0,206 m
Longueur suivant Y	0,206 m
Longueur suivant Z	1, m
Propriétés	
Volume	3,3329e-002 m ³
Valeur du facteur d'échelle	1,
Statistiques	
Corps	20
Corps actifs	20
Nœuds	1514004
Éléments	1493875
Paramètres de maillage	Aucun
Options de géométrie avancées	
Utiliser l'associativité	Oui
Systèmes de coordonnées	Non
Enregistrer le fichier mis à jour par le Reader	Non
Utiliser les occurrences	Oui

Chapitre III : Méthode de résolution numérique

Mise à jour CAO intelligente	Non
Comparer les pièces sur la mise à jour	Non
Lier via un fichier temporaire	Oui
Répertoire temporaire	C:\Users\User\AppData\Roaming\Ansys\v160
Type d'analyse	3D
Décomposer les géométries disjointes	Oui
Traitement de la symétrie et de la fonction Englobber	Non

TABLEAU 3 : Modèle (A3) > Géométrie > Groupes de corps

Nom de l'objet	<i>rym</i>
Etat	Maillé
Propriétés graphiques	
Visible	Oui
Définition	
Désactivé	Non
Système de coordonnées	Système de coordonnées par défaut
Boîte englobante	
Longueur suivant X	0,206 m
Longueur suivant Y	0,206 m
Longueur suivant Z	1, m
Propriétés	
Volume	3,3329e-002 m ³
Statistiques	
Nœuds	1514004
Eléments	1493875
Paramètres de maillage	Aucun

TABLEAU 4 : Modèle (A3) > Géométrie > rym > Pièces

Nom de l'objet	<i>isolant</i>	<i>tube 1</i>	<i>tube 2</i>	<i>tube 3</i>	<i>tube 4</i>	<i>tube 5</i>	<i>tube 6</i>	<i>tube 7</i>	<i>tube 8</i>	<i>tube 9</i>	<i>tube 10</i>
Etat	Maillé										
Propriétés graphiques											
Visible	Oui										
Transparence	1										
Définition											
Désactivé	Non										
Système de	Système de coordonnées par défaut										

Chapitre III : Méthode de résolution numérique

coordonnées											
Repère de référence	Lagrangien										
Matériau											
Affectation											
Fluide/Structure	Définie par la géométrie (Solide)										
Boîte englobante											
Longueur suivant X	0,206 m	1,5e-002 m									
Longueur suivant Y	0,206 m	1,5e-002 m									
Longueur suivant Z	1, m										
Propriétés											
Volume	2,9972e-002 m ³	1,7671e-004 m ³									
Coord. X du centre de gravité	8,7749e-005 m	6,9003e-020 m	-8,2681e-004 m	-2,7162e-018 m	-8,2681e-004 m	-1,6536e-003 m	3,474e-002 m	3,5567e-002 m	-3,5567e-002 m	-3,474e-002 m	-3,6394e-002 m
Coord. Y du centre de gravité	2,5326e-011 m	-4,7047e-020 m	4,0592e-002 m	8,1183e-002 m	-4,0592e-002 m	-8,1183e-002 m	2,1012e-002 m	6,1603e-002 m	1,958e-002 m	6,0171e-002 m	-2,1012e-002 m
Coord. Z du centre de gravité	0,5 m										
Statistiques											
Nœuds	1215804	22578	23004	22152	23004	20874		31524	22152	23004	35358
Éléments	1121150	17850	18275	17425	18275	16150		27200	17425	18700	31025
Paramètres de maillage	Aucun										

TABLEAU 5 : Modèle (A3) > Géométrie > rym > Pièces

Nom de l'objet	<i>tube 11</i>	<i>tube 12</i>	<i>tube 13</i>	<i>tube 14</i>	<i>tube 15</i>	<i>tube 16</i>	<i>tube 17</i>	<i>tube 18</i>	<i>tube 19</i>
Etat	Maillé								
Propriétés graphiques									
Visible	Oui								
Transparence	1								

Chapitre III : Méthode de résolution numérique

Définition									
Désactivé	Non								
Système de coordonnées	Système de coordonnées par défaut								
Repère de référence	Lagrangien								
Matériau									
Affectation									
Fluide/Structure	Définie par la géométrie (Solide)								
Boîte englobante									
Longueur suivant X	1,5e-002 m								
Longueur suivant Y	1,5e-002 m								
Longueur suivant Z	1, m								
Propriétés									
Volume	1,7671e-004 m ³								
Coord. X du centre de gravité	-3,722e-002 m	3,3913e-002 m	3,3086e-002 m	-7,0307e-002 m	-7,1133e-002 m	-7,196e-002 m	6,8653e-002 m	6,948e-002 m	7,0307e-002 m
Coord. Y du centre de gravité	-6,1603e-002 m	-1,958e-002 m	-6,0171e-002 m	4,0592e-002 m	-2,2708e-018 m	-4,0592e-002 m		7,9667e-019 m	4,0592e-002 m
Coord. Z du centre de gravité	0,5 m								
Statistiques									
Nœuds	31950	24708	23856	22578	20448	23004	23430	22578	23004
Éléments	28050	19975	19125	18275	15725	18275	18700	17850	18275
Paramètres de maillage	Aucun								

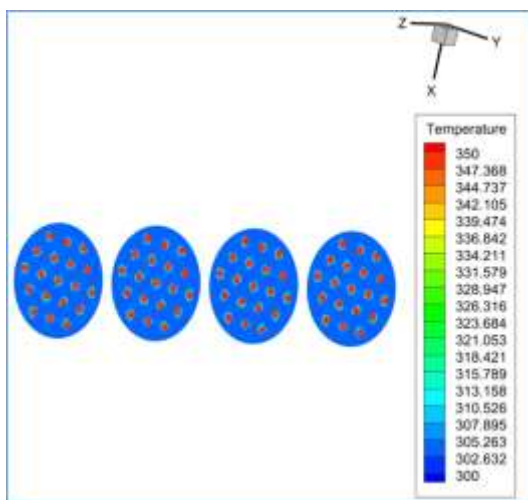
Chapitre IV

Résultats et discussion

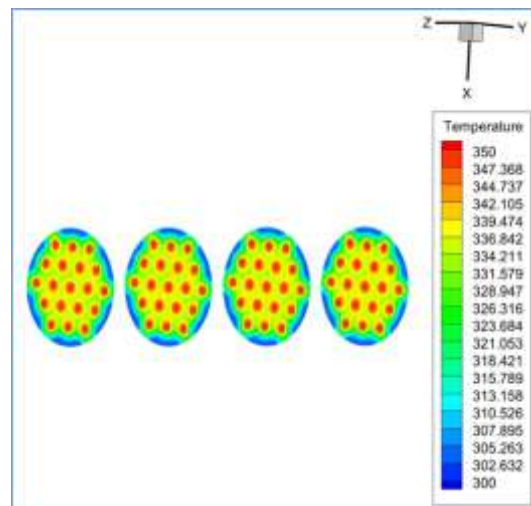
IV.1 Résultats des paramètres sur les paraffines :

IV.1.1 Paraffine 1 :

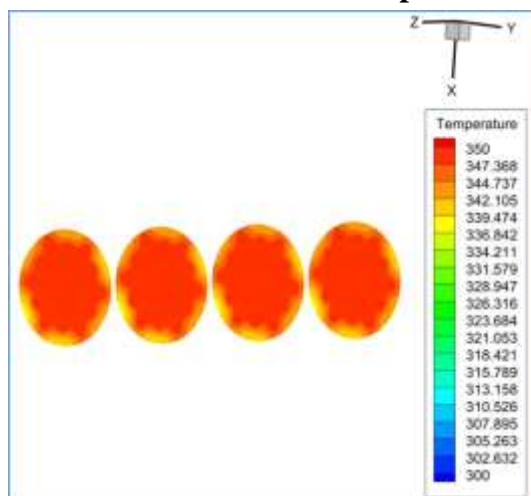
IV.1.1.1 Isothermes :



Temps= 30 sec



Temps = 65 min



Temps =130 min

Figure IV-1 : Isothermes paraffine1

- les figures montrent une distribution de températures de 300 à 350 K dans des sections transversales d'un cylindre représenté en un code de couleur bleu pour la température la plus basse qui est la température initiale qui apparait dans la zone pariétale et la couleur rouge pour la température maximale qui est la température finale, les 4 surfaces montrent des températures similaires et régulières qui représentent une homogénéité dans le processus de chauffage, l'atteinte de température maximale se fait en 130 min.

IV.1.1.2 Fraction de fusion :

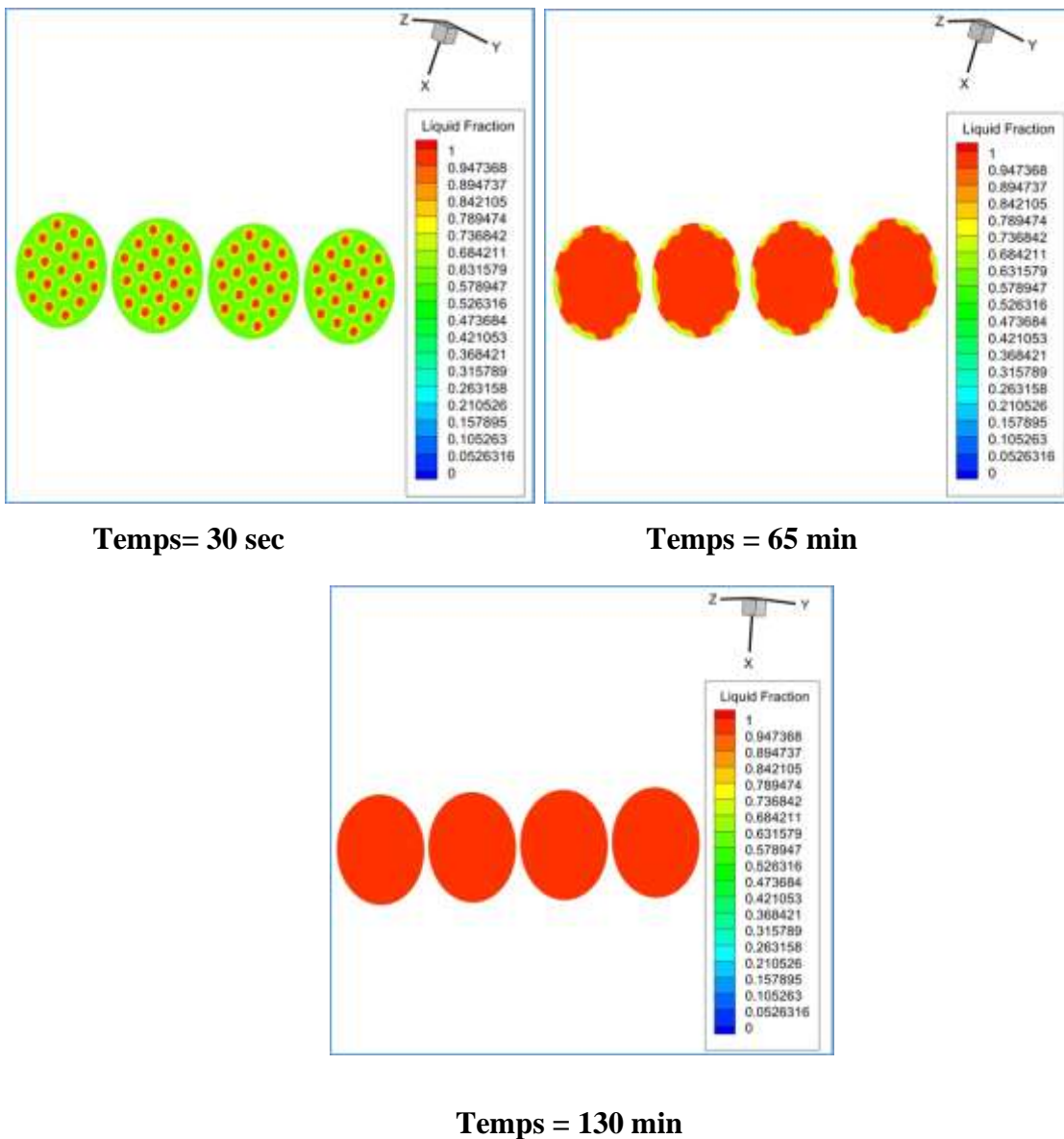


Figure IV-2 : Fraction de fusion de la paraffine 1

- les figures ci-dessus représentent la fraction de fusion de la paraffine en fonction du temps qui varie de 0 comme valeur initiale de l'état solide jusqu'à 1 valeur maximale atteinte en 130 min qui représente l'état liquide caractérisé par une forte concentration de chaleur et une couleur rouge, cette dernière est observé dans la zone centrale de l'écoulement, en ce qui concerne la zone pariétale au voisinage des tubes on remarque qu'elle est caractérisé par une couleur verte qui change en fonction du temps pour devenir de plus en plus foncé jusqu'à atteindre la couleur rouge indiquant le changement de phase du solide vers le liquide.

IV.1.2 Paraffine 2

IV.1.2.1 Isothermes :

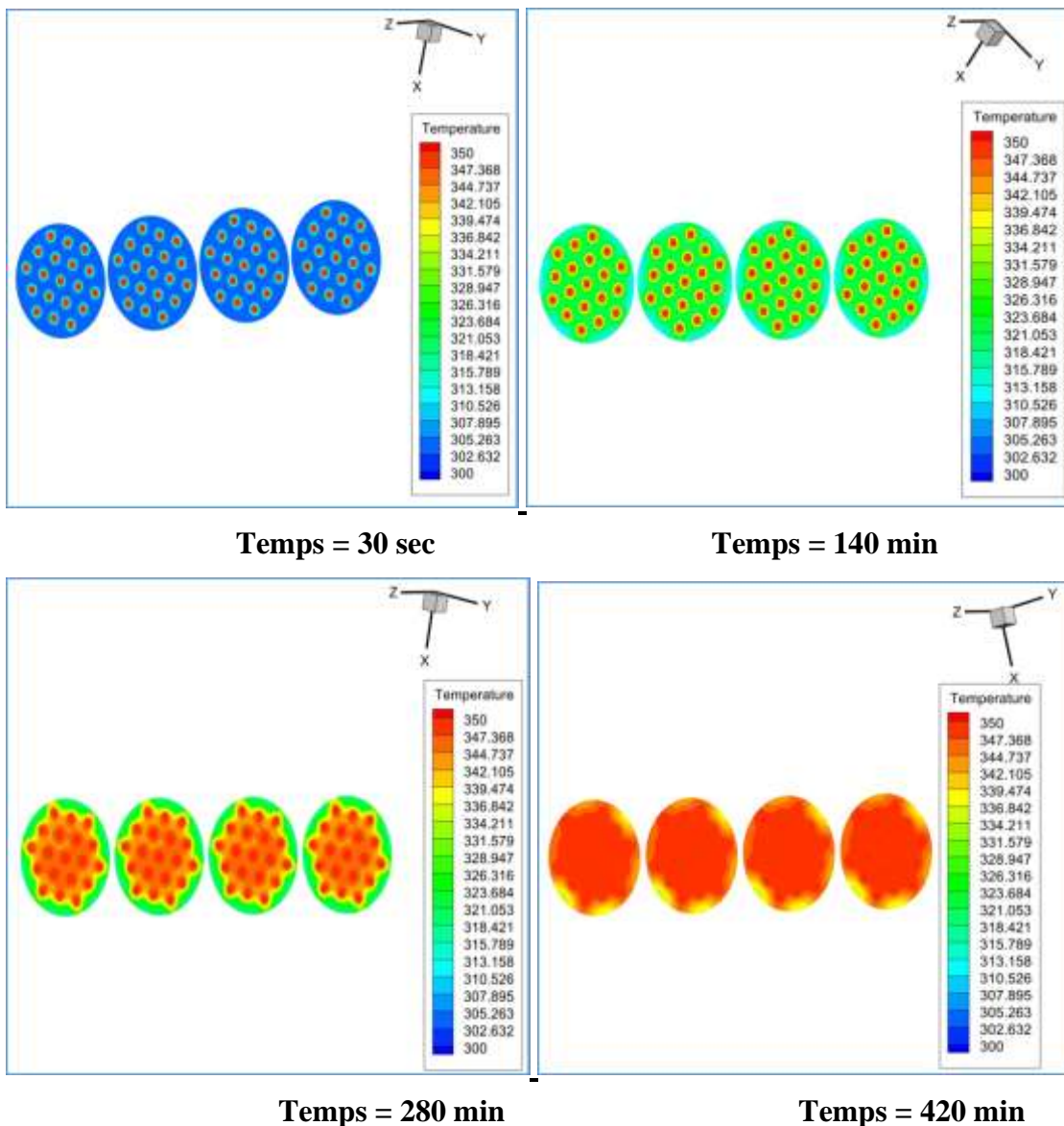


Figure IV-3 : Isothermes paraffine 2

IV.1.2.2 Fraction de fusion:

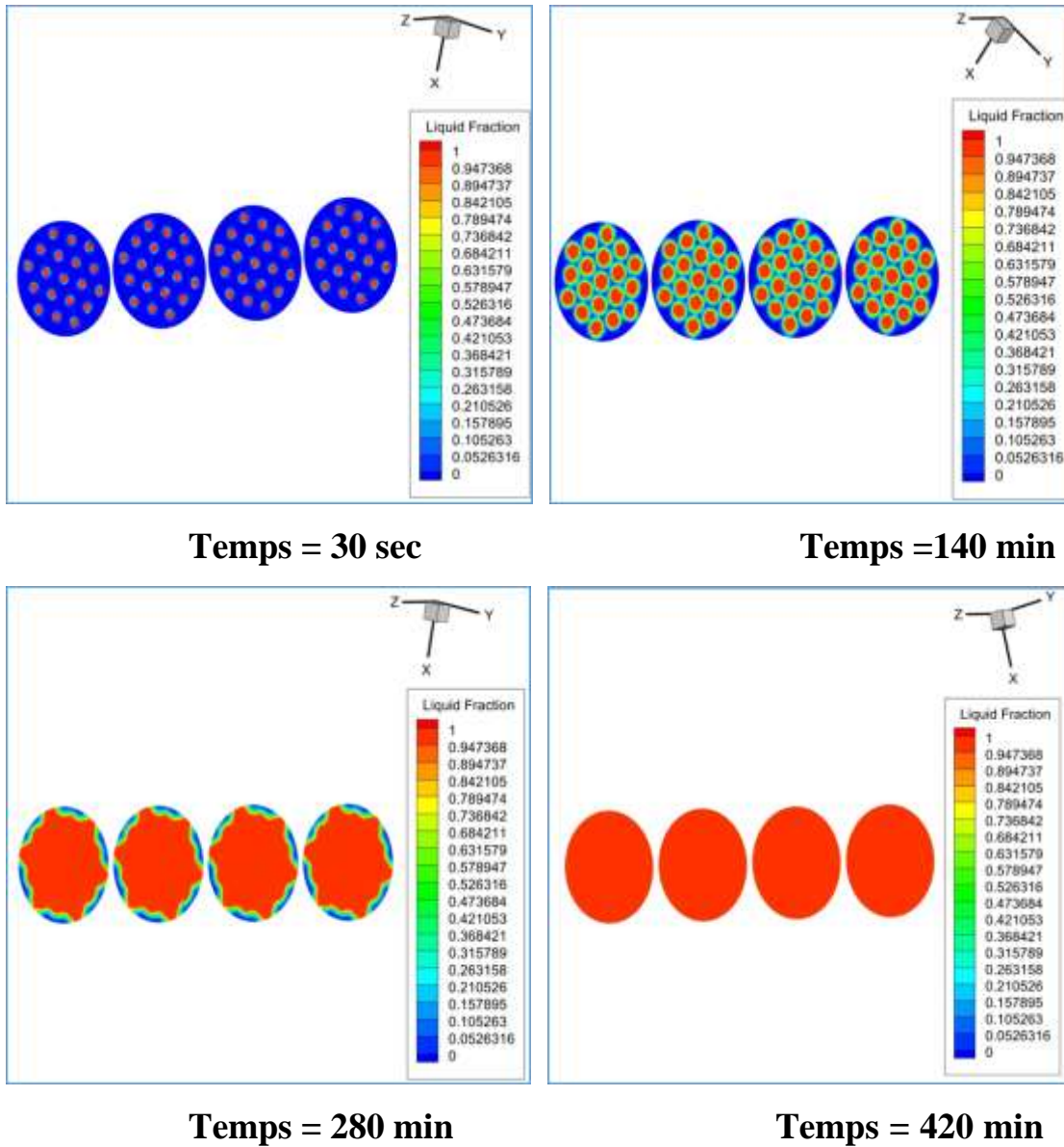


Figure IV-4 : Fraction de fusion de la paraffine 2

IV.1.3 Paraffine 3 :

IV.1.3.1 Isothermes :

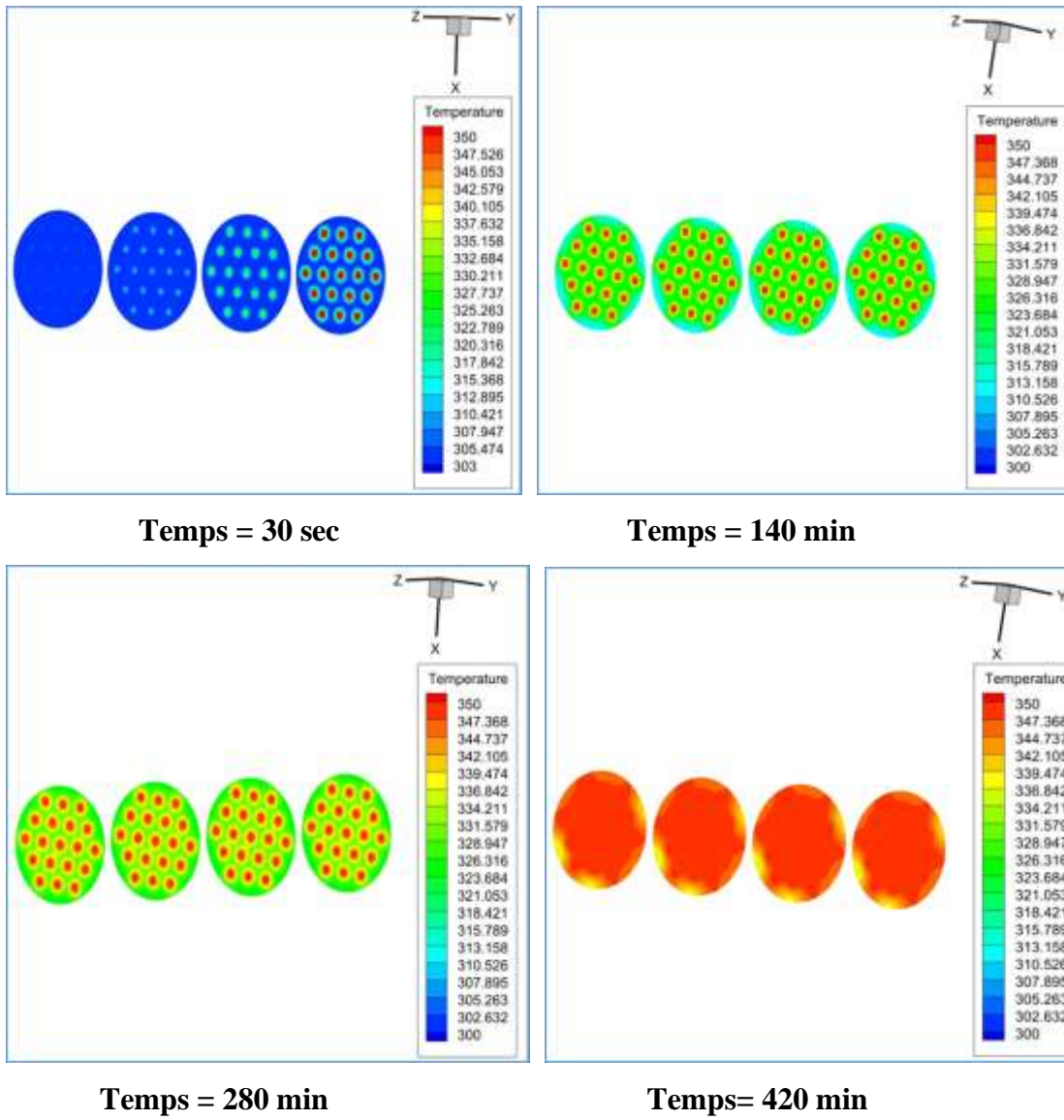


Figure IV-5 : Isothermes paraffine 3

IV.1.3.2 Fraction de fusion :

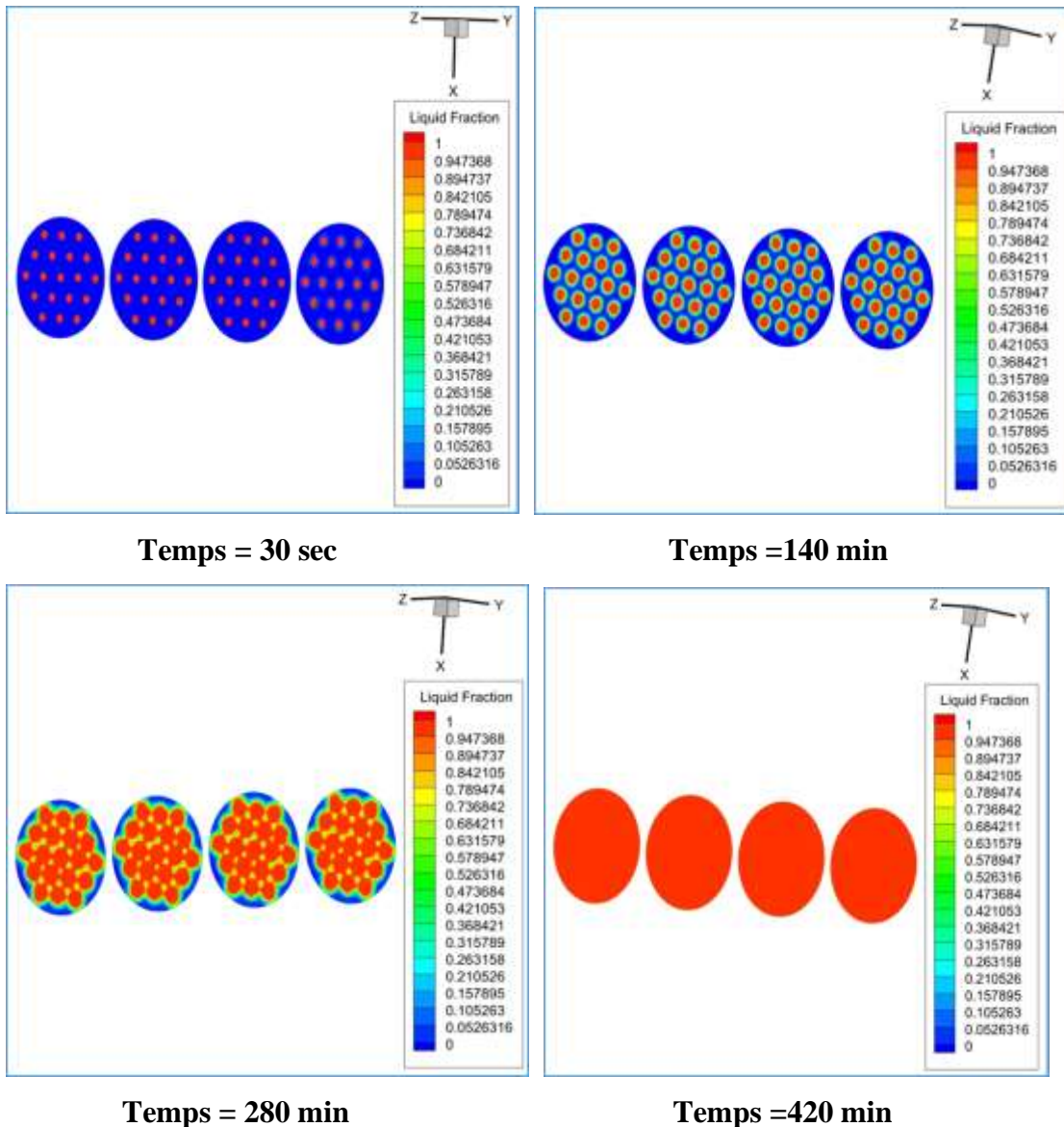


Figure IV-6 : Fraction de fusion de la paraffine 3

- **Interprétation des résultats de température pour la 2^{ème} et 3^{ème} paraffine :** les figures ci-dessus illustrent des contours de températures appelés isothermes avec 2 différents types d'écoulement : écoulement tubulaire et écoulement inter-tubulaire. En commençant par la zone centrale de l'écoulement qui est tubulaire, on remarque une distribution de la température symétrique caractérisée par un fort gradient de température de 350 K, indiqué par la couleur rouge. Ces tubes sont considérés comme source de chaleur ; allant vers les parois de l'isolant, on remarque un écoulement inter-

tubulaire caractérisé par un faible gradient de température qui en fonction du temps augmente avec une dissipation de chaleur radiale jusqu'à atteindre les 420 min où la température est presque la même au voisinage de l'enceinte et dans l'espace inter tubulaire.

- **Interprétation des résultats du fraction de fusion pour la 2^{ème} et la 3^{ème} paraffine :** les figures ci-dessus représentent la fraction de fusion de la paraffine en fonction du temps qui varie de 0 comme valeur initiale de l'état solide jusqu'à 1 valeur maximale atteinte en 420 min qui représente l'état liquide caractérisé par la couleur rouge, cette dernière est observé dans la zone centrale de l'écoulement tubulaire, en ce qui concerne la zone pariétale au voisinage des tubes on remarque qu'elle est caractérisé par une couleur bleu qui change en fonction du temps pour devenir de plus en plus foncé jusqu'à atteindre la couleur rouge indiquant le changement de phase du solide vers le liquide.

IV.2 Interprétation des tracés

IV.2.1 Tracé de la température

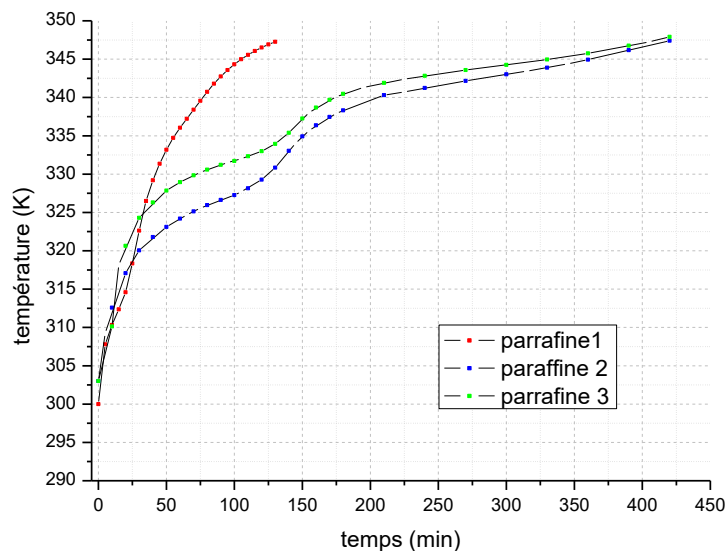


Figure IV-7 : Graphe de température en fonction du temps

Données :

- Température d'entrée du fluide est égale à 350 K.

Chapitre IV : Résultats et discussion

➤ Vitesse d'entrée du fluide égale à 1 m/s

La figure-IV7 illustre la variation de température en fonction du temps pour trois différentes paraffines à une température initiale du fluide qui est égale à 350 K

D'après la figure représentée ci-dessus, on remarque que la température augmente en fonction du temps pour les 3 paraffines initialement à $t=0$, les paraffines sont à l'état solide, de plus en plus que la température augmente les paraffines se réchauffent et change mutuellement d'état (à noter que la résolution est stoppée à partir de la fusion totale du matériau sauf pour la 1^{ère} paraffine).

Pour la première paraffine, on constate que la température de fusion complète est $T=341$ K atteinte en un temps qui est de $t=80$ min, et ne cesse d'augmenter jusqu'à atteindre les 348 K (à noter que c'est la température atteinte par les deux autres paraffines).

Pour les deux autres restantes on observe un comportement similaire de la variation de la température dans les conditions notées ci-dessus, et la fusion totale de ces paraffines s'effectue à $t=420$ min ce qui est équivalent à 7h à une température $T=348$ K

On note la présence de trois (3) régions progressivement que la température accroit

- Une région où la diffusion du flux de chaleur débute de $t=0$ à $t=40$ min, l'augmentation de température est rapide, étant donné que le milieu du matériau de la paraffine est froid et en mesure d'absorber un flux de chaleur rapidement surtout au voisinage des tubes.
- Pour les 2 régions restantes, la région 2 de $t=40$ min à $t=135$ min et la 3^{ème} région de $t=135$ min jusqu'à $t=420$ min, l'absorption du flux de chaleur a diminué par rapport à la 1^{ère} région en raison de saturation au voisinage des tubes mais la température reste en évolution jusqu'à atteindre les 348 K ce qui explique la courbe résultante.

Par conséquent la paraffine 2 est le matériau ayant la meilleure absorption de la chaleur suivie de la 3^{ème} paraffine qui est intermédiaire

Par contre la paraffine 1 est caractérisée par la plus courte durée de charge en un temps $t=80$ min.

IV.2.2 Tracé de la fraction de fusion

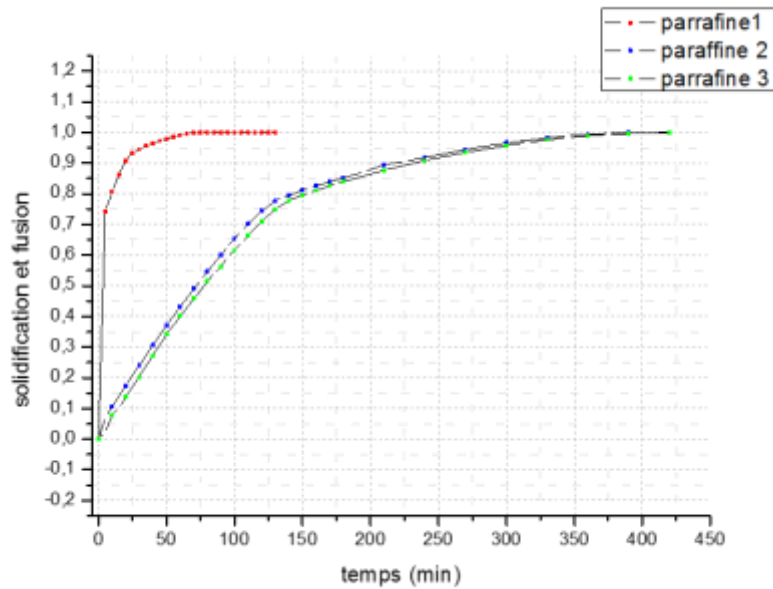


Figure IV-8 : Graphe de fraction de fusion

La figure-8 renomme l'évolution du taux de fraction des trois types de paraffines par rapport au temps

On remarque que le taux de fraction croit proportionnellement avec le temps pour les 3 cas, initialement à $t=0$ les paraffines sont à l'état solide, en prenant en considération la figure précédente qui a montré que les paraffines s'échauffaient avec la variation de température en fonction du temps, il y a un changement de phase.

Pour la RT30, on remarque que le taux de la fraction de la paraffine ne cesse d'augmenter jusqu'à atteindre la valeur du taux de fraction maximale qui est égal à 1 ce qui vaut à un changement d'état.

En ce qui concerne la Tétracosane et la Héptacosane, on observe une allure similaire pour les deux graphes, la variation du taux de fraction se fait de $t=0$ quand la valeur est de 0 jusqu'à $t=420$ min ou le matériau fond complètement.

On note la présence d'une seule région avant la stabilisation du taux pour atteindre le changement d'état, concernant la 1^{ère} paraffine la région est à $t=20$ min ou le taux égale à 0.90 et pour la 2^{ème} et la 3^{ème} est à $t=125$ min avec des taux respectivement de 0.76 et 0.73.

Considérablement, la 1^{ère} paraffine à une transition de phase rapide par rapport aux 2 autres paraffines.

En ce qui concerne la paraffine 2 et 3 montrent une transition plus progressive, ce qui peut suggérer une plus grande stabilité thermique.

IV.2.3 Tracé de densité

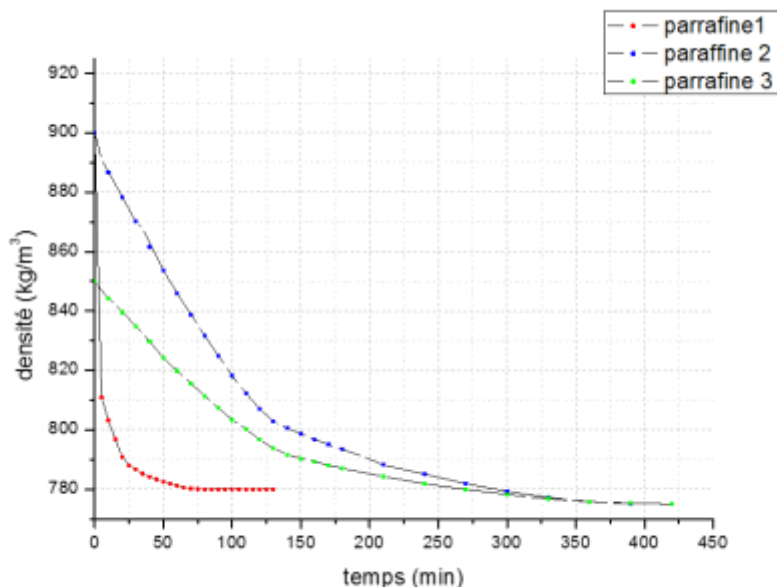


Figure IV-8 : Graphe de densité en fonction du temps

La figure-9 illustre la variation de la densité en fonction du temps pour trois différents types de paraffines ayant des densités de 900 kg/m^3 et 850 kg/m^3 .

D'après l'arborescence représentée dans la figure, on remarque la diminution de la valeur de la densité en fonction du temps, au début à $t=0$ toutes les paraffines sont à la valeur initiale vu leurs état solide et de plus en plus qu'elles fondent en fonction de l'augmentation de température la densité diminue, étant donné la relation proportionnelle du volume avec la température et que de la densité est égale la masse sur le volume pour la plus part des substances à l'état solide la densité est plus grande et diminue en fonction du changement d'état .

En ce qui concerne la 1^{ère} paraffine, on observe une diminution aiguë de la valeur de la densité atteignant la valeur de 810 kg/m^3 en 5 min, et abouti à sa valeur finale qui est de 780 kg/m^3 en $t=80$ min ou elle stabilise et ne change pas indiquant qu'elle peut fondre ou se stabiliser en un temps moindre que les autres paraffines

A la différence des valeurs initiales qui sont respectivement 900 kg/m^3 et 850 kg/m^3 pour la 2^{ème} et la 3^{ème} paraffine, on a remarqué précédemment un comportement identique, mais

même si la fusion se fait en 420 min permettant aux 2 cas d'atteindre la valeur de 775 kg/m^3 , il ya une différence dans la diminution, pour la 2^{ème} paraffine la diminution est plus lente et progressive, suggérant qu'elle reste solide ou partiellement solide plus longtemps, et la 3^{ème} paraffine est intermédiaire entre les 2 autres cas ni plus rapide que la 1^{ère} paraffine ni plus lente que la 2^{ème}.

On note une région de changement pour la stabilisation des 3 types, concernant la 1^{ère} paraffine la valeur de changement est un temps de $t=20$ min avec une valeur de 790.98 kg/m^3 , par rapport à la 2^{ème} et la 3^{ème} paraffine la région est a $t=125$ min a des valeurs de 806.80 kg/m^3 et 795.18 kg/m^3 .

Ces différences sont du a des conditions initiales telles que l'écart entre la température de solidification et la température de fusion.

IV.2.4 Tracé de Nusselt :

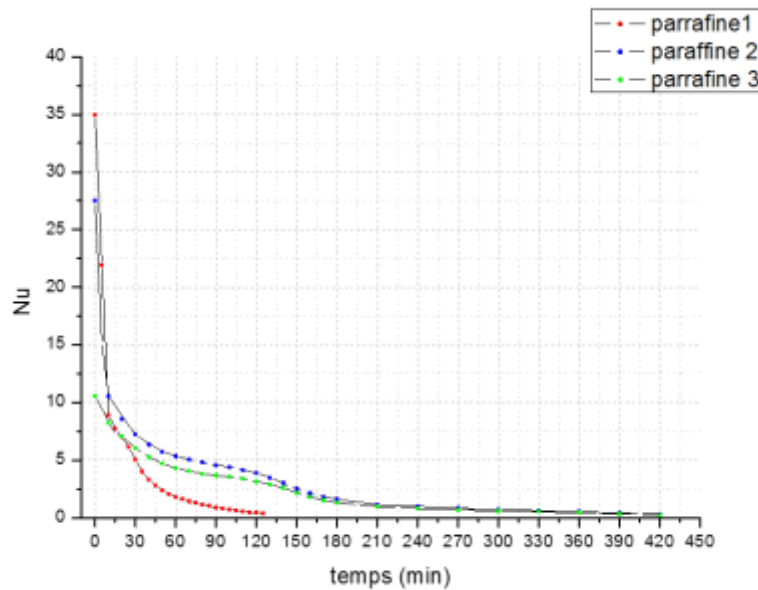


Figure IV-10 : Graphe de Nusselt en fonction du temps

La figure-10 représente le changement du nombre Nusselt en fonction du temps, c'est une grandeur adimensionnelle en transfert de chaleur, représentant le rapport entre le transfert par convection et le transfert par conduction

D'après le tracé affiché sur la figure ci-dessus, on aperçoit une diminution rapide du nombre de Nusselt en fonction du temps et cela prescrit que la conduction au début du processus de fusion est très efficace, après environs $t=60$ min pour la 1^{ère} paraffine et $t=120$ min pour les 2 autres paraffines on remarque un début de stabilisation à des valeurs plus basses indiquant

l'établissement de l'équilibre thermique et une égalité entre le coefficient de transfert convectif et la conductivité thermique du transfert conductif

Initialement, la paraffine 1 à un nombre Nusselt plus haut égale à 34.97 en comparaison avec les 2 autres, la régression est plus rapide afin d'atteindre la valeur de 1.8047 en $t=60$ min, qui est sa valeur de stabilisation.

Ensuite, la 2^{ème} paraffine a un nombre adimensionnel légèrement plus bas que celui de la 1^{ère} paraffine qui est de 27.5, mais une valeur de stabilisation plus grande qui est égale à 3.87 en un temps supérieur, $t=120$ min.

Et en ce qui concerne la dernière paraffine qui a une valeur initiale de 10.6 suit une arborescence similaire à celle de la 2^{ème} paraffine mais avec une valeur de stabilisation moindre 3.15 en $t=120$ min.

On enregistre la présence de trois régions de plus en plus que le Nusselt décroît

Une région où la fusion débute et le transfert est conductif

Une seconde région où la fusion est partielle et le transfert convectif s'implique

Et une dernière région où il y a l'établissement de l'équilibre thermique et la fusion est totale

En conclusion, la paraffine 2 est meilleure en stockage de chaleur

IV.2.5 Tracé d'énergie :

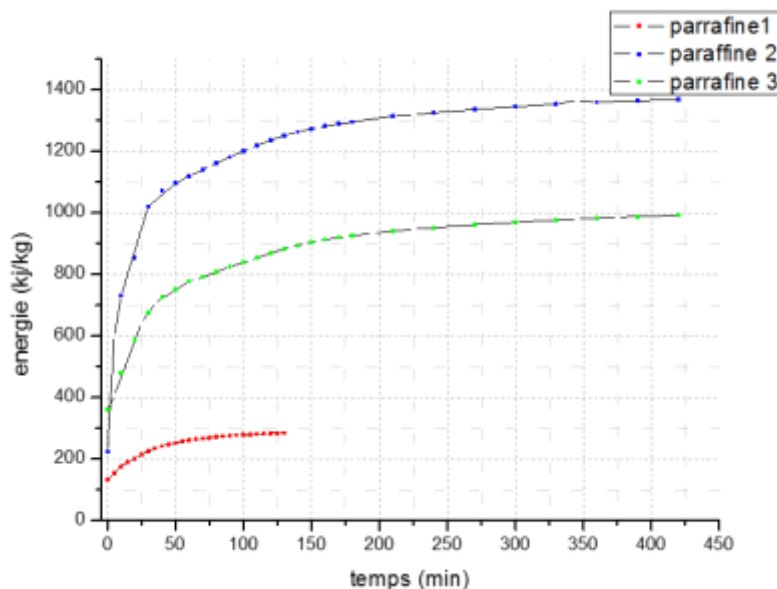


Figure IV-11 : Graphe de l'énergie en fonction du temps

La figure-11 illustre le changement de l'énergie par rapport au temps des 3 types de paraffines à une température initial du fluide qui égale à 350 K

On remarque d'après la figure ci-dessus, une augmentation rapide de l'énergie absorbée par 3 les paraffines, indiquant une absorption initiale efficace de chaleur dans les premiers instants de $t=0$ à $t=30$ min, après les 30 min il y a une phase de stabilisation qui indique les paraffines atteignent leurs capacité maximale de stockage.

En ce qui concerne la 1^{ère} paraffine on constate qu'elle absorbe moins d'énergie que les autres paraffines, elle atteint les 252 kJ/kg en $t=50$ minutes après cette valeur l'évolution de l'énergie n'est pas aussi significative.

Les 2 autres paraffines ont une courbe similaire sauf que la 2^{ème} paraffine a une capacité d'absorption supérieure car elle atteint les 1400 KJ/kg en 420 min alors que la 3^{ème} atteint les 1000 KJ/kg en un même temps.

Par conséquent, la 2^{ème} paraffine est la plus efficace pour le stockage de chaleur, avec une capacité d'absorption et de stockage d'énergie significativement supérieure aux autres.

IV.2.6 Processus de charge et décharge pour la 3^{ème} paraffine :

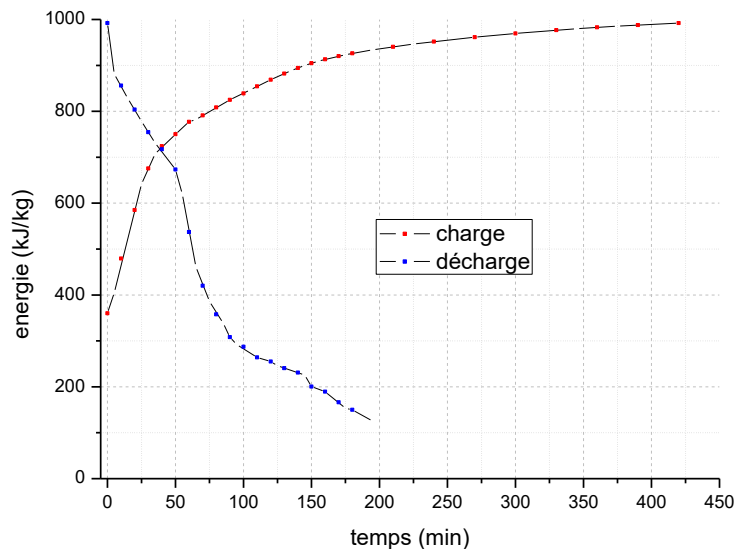


Figure IV-12 : Graphe de comparaison d'énergie

La figure-12 illustre la variation d'énergie en fonction du temps pour deux phases distinctes la charge et la décharge de la 3^{ème} paraffine.

Chapitre IV : Résultats et discussion

Concernant la phase de charge qui est un processus de fusion de la paraffine, la température d'entrée du fluide caloporteur est fixée à 350 K avec une vitesse d'entrée de 1m/s et pour le processus de décharge qui est un processus de solidification du matériau a changement de phase où la température d'entrée du fluide est de 300 K avec une vitesse d'entrée de 0.2 m/s.

On remarque que la courbe de l'énergie pendant la charge augmente rapidement dans les premiers instants de $t=0$ min à $t=100$ min atteignant la valeur de 838 kJ/kg signe que la chaleur latente de fusion est absorbée par la paraffine, ensuite la valeur de l'énergie commence à se stabiliser indiquant une fusion partielle jusqu'à atteindre sa valeur maximale en 420 min ce qui veut dire que la paraffine a complètement fondue.

On observe une diminution lente d'énergie par rapport à la phase de charge et cela est dû à la vitesse d'entrée du fluide qui est plus basse afin de prolonger la durée de décharge, malgré que dans les premiers instants de $t=0$ min a $t= 100$ min la décharge est rapide atteignant les 287kJ/kg cela est due à un transfert de chaleur efficace en raison de la différence de température entre l'entrée et la sortie du fluide, de $t=100$ min a $t=195$ min on remarque une stabilisation de l'énergie en raison de la saturation du système et la solidification du matériau a changement de phase.

Conclusion générale

Dans ce mémoire, nous avons étudié numériquement en 3D le comportement de trois types de paraffines utilisé comme matériau à changement de phase (RT30, C24 H50 et C27 H56) dans une enceinte cylindrique verticale, soumise à une source de chaleur qui est le fluide caloporteur traversant 19 tubes cylindriques à l'intérieur de l'enceinte. Les propriétés thermophysiques du fluide et du matériau à changement de phase sont prises en compte. Ce problème physique est modélisé par les équations différentielles aux dérivées partielles de conservation de la masse, de conservation de quantité de mouvement, ainsi que par l'équation de conservation de l'énergie.

La méthode des volumes finis est utilisée pour discrétiser les équations de Navier-Stokes et de l'énergie sur un maillage uniforme. La solution de ce système d'équations de discrétisation couplage vitesse-pression utilise l'algorithme SIMPLE suivi d'une discrétisation spatiale avec une pente dont la méthode de calcul du gradient est basé sur les nœuds de Green-Gauss, une pression une quantité de mouvement et d'énergie avec un schéma de discrétisation second Ordre.

Les deux paramètres de contrôle fixé dans ce problème sont le rapport d'aspect géométrique de l'enceinte et le HTF. Les paramètres de contrôle variables sont la température et la densité des trois paraffines.

Les résultats montrent des variations significatives de la température, de la fraction volumique, de la densité, du nombre de Nusselt, et de l'énergie absorbée en fonction du temps.

- Principaux résultats :
 - Concernant la température on remarque une augmentation jusqu'à atteindre les 341 K en 80 min pour la 1^{ère} paraffine et 348 K pour les 2 autres paraffines en 420 min.
 - En parlant d'augmentation de température, on aborde le sujet de fraction de fusion qui varie de 0 à 1, partant d'un état solide à une fusion complète, la RT30 montre une transition rapide atteignant la valeur de 1 en 80 min, concernant la Tétracosane

Conclusion générale

et l'Héptacosane présentent une transition plus progressive, atteignant leur taux maximal en 420 minutes.

- La densité a une relation directe avec l'état du matériau, elle diminue au fur et à mesure que les paraffines fondent. La Paraffine 1 montre une diminution rapide de la densité, atteignant 780 kg/m^3 en 80 minutes. La Tétracosane et l'Héptacosane diminuent plus lentement, atteignant 775 kg/m^3 en 420 minutes.
 - Le nombre de Nusselt diminue rapidement au début du processus de fusion, indiquant une convection initialement efficace. Après environ 60 minutes pour la Paraffine 1 et 120 minutes pour les autres paraffines, le transfert de chaleur par conduction devient prédominant.
 - L'énergie absorbée augmente rapidement dans les premiers instants, puis se stabilise. La Paraffine 2 montre la plus grande capacité d'absorption, atteignant 1400 kJ/kg en 420 minutes, suivie par la Paraffine 3 avec 1000 kJ/kg . La Paraffine 1 absorbe moins d'énergie, atteignant 252 kJ/kg en 50 minutes.
- Observations Clés :
 - Convection forcée : le chauffage des tubes est pariétal donc il commence en surface ce qui donne des isothermes symétriques par rapport au plan transversal, en négligeant la convection naturelle l'approximation de Boussinesq devient nulle et la gravité n'est plus prise en considération de ce fait on a obtenu un mode de transfert de chaleur prédominant qui est la convection forcée.
 - Régime turbulent : afin d'éviter le changement de phase du fluide on a choisi une grande vitesse d'entrée du fluide.

- En conclusion

La 2^{ème} Paraffine qui est la Tétracosane est la plus efficace pour le transfert de chaleur, montre une transition plus progressive de fusion suggérant qu'elle est plus stable thermiquement et se distingue par sa capacité supérieure d'absorption et de stockage d'énergie ce qui la rends idéale pour cette étude.

Références

1. Errahmen, B.N.H., Energie éolienne, in Département Electrotechnique. 2021, Université Badji Mokhtar-Annaba: Annaba.
2. Ghennam, T., Management of a wind farm and integration in the operational power system, Contribution of multilevel power electronic converters for the control of doubly fed induction machine based wind generators
Supervision d'une ferme éolienne pour son intégration dans la gestion d'un réseau électrique, Apports des convertisseurs multi niveaux au réglage des éoliennes à base de machine asynchrone à double alimentation. 2011, Ecole Centrale de Lille
École Militaire Polytechnique (Alger).
3. Anjou, C., Geothermal energy : representations, teachings, and contexts in the West Indies and in the Caribbean area
L'énergie géothermique : représentations, enseignements et contextes aux Antilles et dans la zone caraïbe. 2018, Université des Antilles.
4. Sayad, A., Etude expérimentale d'un échangeur eau-air dans la région de Biskra ; Utilisation de la géothermie pour la climatisation des habitats., in département Génie mécanique. 2020, Université Mohamed khider de Biskra
5. Géothermique, U.C., Géothermie.
6. Violay, M., High enthalpy hydro-geothermal reservoirs: insights from basalt petrophysical properties. 2010.
7. Abdeldjalil, C.A.G., Etude et choix d'une turbine hydroélectrique, in département Génie Mécanique 2022, Mohamed Boudiaf University of M'sila.
8. raouf, B.M.A., Turbinage des eaux usées (réalisation d'un modèle prototype), in Département de Génie civil et d'Hydraulique. 2019, Université Mohamed khider – Biskra.
9. Yagoub Nadjet, M.G., Etude et Régulation d'un Convertisseur Boost Elévateur DC-DC Appliqué au Système Photovoltaïque, in departement de genie électrique. 2022, Université Abdelhamid Ibn Badis Mostaganem.

10. Etude d'un système photovoltaïque connecté au réseau, in Département d'Electrotechnique. 2008, Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou.
11. Abdelmoumen, B.N.A., Dimensionnement d'un Système photovoltaïque Orienté pour alimenter l'électrolyseur pour produire de l'hydrogène vert, in Département des énergies renouvelables. 2023, Université Kasdi Merbah-Ouargla.
12. Boudries, R., et al., Hydrogen as an energy carrier. 2012. p. 147-184.
13. Hoffmann, J.-F., Thermal energy storage system with natural or recycled materials for concentrating solar power plant

Stockage thermique pour centrale solaire thermodynamique à concentration mettant en oeuvre des matériaux céramiques naturels ou recyclés. 2015, Université de Perpignan.

14. Chili Nassim, B.M., Étude d'un système de stockage thermique par chaleur latente à changement de phase : application à un système solaire de production d'eau chaude sanitaire, in génie mécanique Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou. p. 4-8.
15. Khaoula, I., Contribution à l'Analyse des problèmes de Stockage dans les Centrales Solaires Thermiques, in Département de Génie Mécanique. 2021, École Nationale Polytechnique. p. 4-6.
16. Lacene, M. and M. Gherab, Etude et réalisation d'un concentrateur solaire avec stockage d'énergie thermique Présenté. 2016, Université Mouloud Mammeri Tizi-Ouzou.
17. Chaouki, B., Revue sur les centrales solaires thermodynamiques, in Département de Génie Mécanique. 2015, école nationale polytechnique. p. 39.
18. Mokhtari, M. and S. Amarouche, Etude d'un système de stockage thermique par chaleur latente à changement de phase: application au refroidissement d'un capteur photovoltaïque. 2021, Université Mouloud Mammeri Tizi Ouzou.
19. Pardo, P., Development of a high temperature thermochemical heat energy storage process

Développement d'un procédé de stockage d'énergie thermique haute température par voie thermochimique. 2013, Institut National Polytechnique de Toulouse - INPT.

20. Roget, F., Definition , modeling and experimental validation of a thermal storage capacity by latent heat adapted to a solar thermal power plant at low temperature
- Définition, modélisation et validation expérimentale d'une capacité de stockage thermique par chaleur latente adaptée à une centrale thermodynamique solaire à basse température. 2012, Université de Toulon.

21. Abhat, A., Low temperature latent heat thermal energy storage: Heat storage materials. *Solar Energy*, 1983. **30**(4): p. 313-332.
22. Guezei, A., Etude numérique des transferts de chaleur et de masse lors de la fusion d'un matériau à changement de phase. 2018.
23. Noridine, A., Etude numérique de stockage thermique dans un échangeur à PCM. 2017, Université Ibn Khaldoun.
24. Soupart-Caron, A., Soupart, Latent heat storage with phase change material Stockage de chaleur dans les matériaux à changement de phase. 2015, Université Grenoble Alpes.
25. Rieger, H., U. Projahn, and H. Beer, Analysis of the heat transport mechanisms during melting around a horizontal circular cylinder. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 1982. **25**(1): p. 137-147.
26. Lacroix, M., Numerical simulation of a shell-and-tube latent heat thermal energy storage unit. *Solar energy*, 1993. **50**(4): p. 357-367.
27. Ismail, K.A.R., O.C. Quispe, and J.R. Henríquez, A numerical and experimental study on a parallel plate ice bank. *Applied Thermal Engineering*, 1999. **19**(2): p. 163-193.
28. Çengel, Y.A., A.J. Ghajar, and M. Kanoglu, Heat and mass transfer : fundamentals and applications. 4th , in SI units ed. Çengel series in engineering thermal-fluid sciences. 2011: McGraw-Hill. xxi, 902 p.
29. Ferrag, F., Introduction aux modes de transfert de chaleur et exercices d'application. 2020.
30. Castets, O., Transfert de chaleur. 2008.
31. Bianchi, A.-M., Y. Fautrelle, and J. Etay, Transferts thermiques. 2004: PPUR presses polytechniques.
32. plus, E. Four à convection forcée et four combiné air-vapeur (électrique). 12/04/2024 25/09/2007]; Available from: <https://energieplus-lesite.be>.
33. sciences, p. les transferts de chaleur 2021 21/01/2021]; physique, chaleur et l'énergie]. Available from: <https://parlonssciences.ca/ressources-pedagogiques/documents-dinformation/les-transferts-de-chaleur>.
34. Çengel, Y.A. and J.M. Cimbala, Mécanique des fluides. 2017: De Boeck supérieur.
35. Sakir Amiroudine, J.-L.B., mécanique des fluides. Vol. ISBN 978-2-10-056922-9. 2011, Paris Dunod. 314.

36. Baliga, B. and S. Patankar, A new finite-element formulation for convection-diffusion problems. *Numerical Heat Transfer*, 1980. **3**(4): p. 393-409.