N° d'ordre :

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE Dr YAHIA FARES DE MEDEA

FACULTÉ DES SCIENCES ET DE LA TECHNOLOGIE



MEMOIRE

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

En : PHYSIQUE

Spécialité : physique des matériaux

Par l'étudiant: **ALLANE Boubaker**

Sujet :

EFFICACITE DES DIFFERENTS MATERIAUX DE CONSTRUCTIOND'UNE CUVE DE STOCKAGE A DOUBLE ENVELOPPES D'UN CHAUFFE-EAU SOLAIRE

Soutenu publiquement **15/06/2016**, devant un jury composé de :

S.HAIRECHE	**MCB/ UYM**	**Président**
M. GUERABA	**MAA /UYM**	**Examinateur**
M. MEBARKI	**MAB / UYM**	**Examinateur**
K.BELAHDA	**MAB/ UYM**	**Encadreur**
M. DOUCHA	**MAB /U. Khemis.Meliana**	**Invité**

Année universitaire : 2015/2016

A la mémoire de mes grands-parents,

A mes très chers parents,

A mes chers frères et sœurs,

A mes meilleurs amis

Je dédie ce mémoire.

Remerciements

Je tiens à remercier spécialement les différentes personnes qui ont rendu possible l'aboutissement de ce travail de **M**aster.

En premier lieu, j'aimerais remercier vivement, mon directeur de mémoire, **M**onsieur **K**. **BELAHDA**, **M**aître **A**ssistant à la faculté des sciences et de la technologie **UM**, pour l'attention et le soutien qu'il a porté à mon travail de master et pour m'avoir guidé et encouragé tout au long de ce travail. Ses précieux conseils m'ont été d'une grande utilité.

Je tiens également à remercier **M Dr. HAIRECHE**, qui m'a fait l'honneur d'accepter la présidence du jury d'évaluation de mon travail. Qu'il trouve ici, l'expression de toute ma gratitude.

Je prie **M M. GUERABA**, **E**nseignant à la faculté des sciences et de la technologie(**UM**), d'accepter mes sentiments respectueux et reconnaissants pour avoir accepté de faire partie du jury.

J'adresse mes vifs remerciements à **M**onsieur **M. MEBARKI**, **E**nseignant à la faculté des sciences et de la technologie(**UM**), pour l'honneur qu'il me fait en participant au jury.

J'exprime mes remerciements à **M**onsieur **M.DOUCHA**, qui a eu l'amabilité de ses conseils le long de mon travail. Qu'il trouve ici l'expression de ma sincère reconnaissance.

Que M B. HASSAID représentant du groupe Alcad Works Détail de l'école :

(ALCAD WORKS a pour vocation le transfert de technologies nouvelles en matière de "Conception et Fabrication Assistées par Ordinateur "C F A O ". Elle est agréée avec statut de distributeur exclusif pour l'Algérie par la Société Solid Works Corporation qui fait-elle même partie du Groupe DASSAULT SYSTEM SA, l'un des leaders mondiaux en la matière. Lieu : ALGER)et son collègue **ABD EL MOUMENE**, reçoivent mes sincères remerciements.

Que mes **PARENTS** reçoivent à travers ces mots toute ma gratitude. Je tiens à les remercier pour sa patience, sa compréhension et son soutien illimité dans tout ce que j'entreprends.

Je dédie ce travail à toute ma famille, qui m'a aidé à me consacrer à mes études.

Enfin, pour leur soutien moral, je voudrais également remercier tous mes collègues de l'université.

Résumé

Le but de ce travail est de faire une comparaison entre quatre dispositifsdifférents d'un échangeur de chaleur à double enveloppe, où l'on peux changerle métal constituantla paroi d'une cuve de stockage où un fluide caloporteur provenant d'un collecteur solaire fournie de la chaleur au fluide froid à partir de la paroi séparatrice de la cuve de stockage, où on s'intéresse à l'efficacité thermique de ces différents métaux .

ملخص

إن الهدف من هاته الدراسة هو اجراء مقارنة بين أربعة نماذج لمبادل حـراري ثنائـي الغـلاف أين نقـوم بتغـيير المعدن المكون لسطح الخزان أين يكون السائل الناقل للحرارة القادم من مجمع شمسي يمـوّن سائل أخـر اقل حـرارة منه بكمية حـرارة عبر حاجز فاصل بينهما حيث نهتم بدراسة فاعلـية هذه المعادن في النقل الحراري .

Abstract

The object ofthis work is tomake a comparison betweenfour different configurationsof metalheat exchangerwhere youcanchange the metal of the storage tank when the transfer fluidof heat comesfrom asolar collector thatheat transfertocold fluidfrom apartition wall, we are interested tostudythe phenomenon ofheat transfer inthis areaas well asthe thermal stratification ofthe storage tank.

SOMMAIRE

Résumé

Introductions générale

CHAPITRE I : Etude bibliographique

I.1) Introduction**……** 4

I.2) Systèmes de chauffe-eau solaires à faible débit ……. 4

1.3) les échangeurs de chaleur dans les systèmes de chauffe-eau solaires……. 5

I.4) les différents travaux réalisés…… 6

I.4.1) le transfert de chaleur par convection naturelle……. 6

I.4.2) le transfert de chaleur par convection mixte……. 8

I.5) le transfert de chaleur dans les échangeurs de chaleur à double enveloppe…… 10

I.5.1) Transfert de chaleur dans les échangeurs de chaleur à double enveloppe horizontaux.. 12

I.5.2) Transfert de chaleur à l'intérieur de la cuve de stockage…… 13

I.6) Chauffe eau solaire individuel…… 14

I.7) Conductivité thermique des substances métalliques……. 16

CHAPITRE II : Modélisation mathématique

II-1) Introduction…….. 18

II-2) les équations qui gouvernent le mouvement……. 18

II-3) L'utilisation de l'approximation de Boussinesq…… 19

II-4) Modélisation du coté turbulent……. 20

II-5) le modèle numérique……. 26

CHAPITRE III : Propriétés physiques des matériaux

III.1) Introduction…… 31

III.2) aluminium (Al)…… 31

III.2.1) Historique……. 31

III.2.2.1) Propriétés physiques…… …… 31

III.2.2.2) Propriétés chimiques…… 32

III.2.2.3) Propriétés biologiques, cinétique dans l'organisme humain et élimination…….. 32

III.3) Fer (Fe)…… 33

III.3.1) Histoire de la métallurgie du fer…… 33

III.3.2) Physico-chimie nucléaire, isotopes, fréquence……. 33

III.3.2.1) Propriétés nucléaires…….. 33

III.3.2.2) Propriétés physiques…….. 34

III.3.2.3) Propriétés chimiques…… 35

III.3.2.3.1) Oxydation du métal…….. 35

III.3.2.3.2) les ions du fer en solution aqueuse…… 35

III.3.2.3.3) Précipitation……. 36

III.3.2.3.4) Oxydoréduction des ions du fer…….. … 36

III.3.2.3.5) Complexassions des ions fer…… 36

III.3.2.3.6) Chimie organométallique…… 37

III.3.2.4) Gisements…… 37

III.4) Cuivre (Cu)……. 38

III.4.1) Historique…… 39

III.4.2) Identification …….. 39

III.4.3) Propriétés physiques et chimiques du corps simple…… 40

III.4.3.1) Propriétés optiques …… 40

III.4.3.2) Propriétés mécaniques et optiques…….. 40

III.4.3.3) Propriétés électriques et thermiques…… 41

III.4.3.4) Propriétés chimiques…… 42

III.5) Acier**……** 44

III.5.1) Histoire…….. 44

III.5.2) Propriétés et caractéristiques…… 44

III.5.3) Normes d'acier…… 45

CHAPITRE IV*:* Résultats et discussions

IV.1) Introduction**……** 46

IV.2) Expériences thermiques**……..** 46

IV.3) Modélisation numérique**……** 46

IV.4) Résultats et discussion**…….** 47

IV.4.1) Maillage du dispositif **……..** 47

IV.4.2) Cuve de stockage en cuivre**……** 48

IV.4.2.1) Profil de température au niveau du gilet**……** 48

IV.4.2.2) Stratification thermique**……..** 49

IV.4.3) Cuve de stockage en aluminium**……** 50

IV.4.3.1) Profil de température au niveau du gilet……..... 50

IV.4.3.2) Stratification thermique…… ……..... 51

IV.4.3.3) Evolution de la température au niveau de l'espace annulaire……..... 51

IV.4.4) Cuve de stockage en fer…….. 52

IV.4.4.1) Profil de température au niveau de l'espace annulaire……..... 52

IV.4.4.2) Stratification thermique…… 52

IV.4.5) Cuve de stockage en acier…… 53

IV.4.5.1) Profil de température au niveau de l'espace annulaire…… 53

IV.4.5.2) Stratification thermique……..... 54

IV.4.6) Comparaison d'évolution de la température……..…..... 55

IV.4.7) Conclusion…….... 56

Conclusion générale

LISTE DES FIGURES

Figure	Légende	Page
	CHAPITRE I	
Fig. I.1	**Schéma d'un système ECSD**	**4**
Fig. I.2	**Présentation d'une installation solaire ECSD**	**14**
Fig. I.3	**Exemple de panneaux solaires thermiques**	**15**
Fig. I.4	**Courbes caractéristiques des rendements des capteurs**	**16**
	CHAPIRE II	
Fig. II.1	**Les relations entre u, $\bar{u}$ et u' pour flux constant et un écoulement instationnaire**	**21**
Fig. II.2	**Les volumes de contrôle dans le modèle de stockage thermique**	**25**
Fig. II.3	**Le bilan énergétique**	**27**
	CHAPITRE III	
Fig. III.1	**Phases solides du fer en fonction de la pression et de la température**	**34**
Fig. III.2	**le cuivre se cristallise dans un système cubique F**	**39**
	CHAPITRE IV	
Fig. IV.1	**Précision des conditions aux limites**	**46**
Fig. IV.2	**Vue en 2D du maillage du dispositif**	**47**
Fig. IV.3	**Vue en 3D du maillage du dispositif**	**48**
Fig. IV.4	**Le profil de température au niveau du gilet**	**48**
Fig. IV.5	**La stratification thermique de la cuve de stockage en cuivre**	**49**
Fig. IV.6	**Profil de température au niveau de la cuve de stockage en cuivre**	**49**
Fig. IV.7	**Profil de température au niveau de l'espace annulaire en fonction de la longueur**	**50**
Fig. IV.8	**Le profil de température au niveau du gilet**	**50**
Fig. IV.9	**La stratification thermique (cuve en aluminium)**	**51**
Fig. IV.10	**L'évolution de la température au niveau du gilet**	**51**
Fig. IV.11	**Le profil de température au niveau du gilet**	**52**
Fig. IV.12	**La stratification thermique (cuve en fer)**	**52**
Fig. IV.13	**Evolution de la température au niveau du gilet**	**53**
Fig. IV.14	**Le profil de température au niveau du gilet**	**53**
Fig. IV.15	**La stratification thermique (cuve en acier)**	**54**
Fig. IV.16	**Evolution de la température au niveau du gilet**	**54**
Fig. IV.17	**Comparaison entre les quatres figures d'evolution**	**55**

LISTE DES TABLEAUX

Tableau	Légende	Page
	CHAPITRE I	
Tab I.1	Conductivité thermique des substances métalliques	**16**
	CHAPITRE III	
Tableau 3.1	Propriétés atomiques de fer	**34**
Tableau 3.2	Propriétés physiques de fer	**35**
	CHAPITRE IV	
Tableau IV.1	Les caractéristiques du dispositif	**47**

NOMENCLATURE

1/ Caractères latins minuscules

Caractère	Signification	Unités
$\mathbf{g}_i$	Gravité, $\mathbf{g}_i = (g_x, g_y, g_z)$.	**m / s ²**
H	Enthalpie totale, H = h + ½ u_i ².	**J / kg**
h	Enthalpie thermodynamique, h = h (T, p).	**J / kg**
k	Conductivité thermique.	**W/(m·K)**
p	Pression	**kg/(m·s²)**
T	Température	**K**
t	Temps	**s**
u_i	Vitesse du fluide, $u_i = (u, v, w)$	**m / s**
μ	Viscosité dynamique	**kg/(m·s)**
ρ	Masse volumique	**kg / m³**
T	Température réelle de l'écoulement	**K**
β	Coefficient de dilatation thermique	**1 / K**
ρ_0	Masse volumique (constante) à la température de fonctionnement, T_0.	**kg / m³**
$\Delta \mathbf{E}_{i,j}$	Energie stockée dans le volume de contrôle # (i, j)	**J**
$\mathbf{E}_s$	Energie solaire entrante dans le volume de contrôle # (i, j)	**J**
$\mathbf{E}_{conv}$	Energie convective entrante dans le volume de contrôle # (i, j)	**J**
$\mathbf{E}_{mix}$	Energie entrante dans le volume de contrôle # (i, j) en raison de mélange	**J**
$\mathbf{E}_{diff}$	Energie de diffusion entrante dans le volume de contrôle # (i, j) due à la conduction thermique entre les volumes de contrôle	**J**
$\mathbf{E}_{aux}$	Energie auxiliaire fournie au volume de contrôle # (i, j)	**J**
$\mathbf{E}_{pert}$	Perte thermique du volume de contrôle # (i, j)	**J**
$\mathbf{E}_{pré}$	Energie prélevée du volume de contrôle # (i, j)	**J**
$\mathbf{T}_p$	Température de paroi où se passe le transfert de chaleur.	**K**
$\mathbf{T}_{f,ent}$	Température d'entrée du fluide.	**K**
$\mathbf{T}_0$	Température de sortie de la double enveloppe.	**K**
$\dot{\mathbf{m}}$	Débit d'écoulement dans la double enveloppe.	**kg / m³**
W	Distance entre la cuve interne et la double enveloppe.	**m**
μ	Viscosité du fluide	**kg/(m·s)**
$\mathbf{c}_p$	Chaleur spécifique du fluide	**J/(kg K)**
h	Longueur l'espace annulaire	**m**
ρ	Densité variable	**kg/m³**
T_0	Température de fonctionnement de l'écoulement	**K**

2/ Nombres adimensionnels.

Pr	Nombre de **Prandtl**.	
Nu	Nombre de **Nusselt**.	
Re	Nombre de **Reynolds**.	
St	Nombre de **Stanton**	

Introduction générale

INTRODUCTION

Depuis le premier choc pétrolier d'octobre **1973**, l'ensemble de la communauté internationale a pris conscience de l'importance vitale des ressources énergétiques pour le développement de notre monde moderne. Les perspectives d'épuisement, à plus ou moins longue échéance, des ressources fossiles sur lesquelles reposent presqu'exclusivement l'activité humaine ont fait que depuis, la problématique énergétique est au centre des préoccupations de tous.

Pour y répondre, des politiques énergétiques ont été mises en place à travers le monde pour, notamment, parvenir à réaliser des économies d'énergie en rationalisant l'utilisation des énergies fossiles et pour trouver des énergies de substitution à ces énergies fossiles.

L'une des premières solutions vers laquelle on s'est tourné dès le départ a été le recours aux énergies renouvelables, principalement l'énergie solaire. En effet, il est de notoriété que l'énergie qui nous provient du Soleil sous forme de rayonnement pourrait, en théorie, suffire à couvrir tous les besoins énergétiques de l'humanité s'il était effectivement possible de la recueillir et de la convertir en totalité. Malheureusement, ce n'est pas le cas. Dans l'état actuel des choses, seule une très petite partie de cette énergie est réellement mise à profit à travers le monde à partir d'applications spécifiques.

Parmi les premières applications solaires auxquelles on a fait appel, l'utilisation thermique de l'énergie solaire par le biais des capteurs solaires plans pour assurer le chauffage de l'eau à des fins sanitaires ou pour la réalisation du chauffage basse température de locaux publics et d'habitations en individuel ou en collectif.

Reposant sur un principe scientifique simple faisant appel à la réalisation de l'effet de serre, le capteur solaire plan a été développé très rapidement pour être utilisé dans le secteur de l'habitat individuel et collectif ainsi que pour certains locaux publics et administratifs. Aujourd'hui, il est d'une application très courante dans plusieurs pays à travers le monde, notamment ceux du pourtour méditerranéen. Bien évidemment, au plan technologique, on est assez loin des premières « boîtes vitrées » réalisées de façon assez rudimentaire. Les systèmes actuels font appels à de hautes technologies pour atteindre de bonnes performances thermiques, garantir une solidité et une durabilité dans le temps pour les équipements et respecter une esthétique moderne en accord avec l'environnement dans lesquels ils sont intégrés.

En tant que pays jouissant d'une bonne position géographique lui permettant de bénéficier d'un des meilleurs taux d'ensoleillement annuel au monde, l'Algérie s'est intéressée dès les premières années à l'utilisation de l'énergie solaire. Diverses applications solaires ont ainsi fait l'objet d'études scientifiques ayant abouti à la réalisation de prototypes qui auraient pu être développés à grande échelle. Malheureusement, les choix politiques inhérents au développement d'une politique énergétique basée sur l'exploitation de ses ressources fossiles ont fortement entravé le développement d'une politique d'économie d'énergie et de recours aux énergies renouvelables, empêchant le développement industriel de ces filières. Beaucoup de réalisations sont ainsi demeurées pendant de longues années au stade embryonnaire.

Toutefois, ces dernières années, l'Algérie semble vouloir réinvestir le secteur des énergies renouvelables et affiche une volonté de développer les applications solaires tant photovoltaïques que thermiques. Une redynamisation du secteur est en cours avec la planification de diverses réalisations concrètes à travers le pays, une réactivation de la recherche dans le domaine, une mise en œuvre d'un cadre législatif approprié et la promotion d'une véritable industrie, publique et privée, dans le secteur.

C'est dans ce contexte que s'inscrit le présent travail qui s'intéresse à la réalisation d'une étude sur un système solaire de production d'eau chaude sanitaire. Il vient étayer un projet de réalisation d'un chauffe-eau solaire de production d'eau chaude sanitaire envisagé par l'Unité de Développement des Equipements Solaires (**UDES**) de Bou Smaïl (Tipasa).

Dans le cadre de ce projet, il a été retenu le développement et la réalisation d'un stockage de l'eau chaude sanitaire dans une cuve métallique horizontale munie d'une enveloppe externe dans laquelle circule le fluide caloporteur issu du capteur solaire. Ce fluide échange sa chaleur avec l'eau froide du réseau, stockée dans la cuve, à travers la paroi de la cuve. Ce qui permet de s'affranchir de l'échangeur de chaleur généralement sous forme de serpentin.

Le travail théorique envisagé ici est relatif à la modélisation de cette cuve de stockage à double enveloppe et à la réalisation d'une étude des transferts thermiques qui ont lieu en son sein aussi bien au niveau de l'enveloppe que dans la cuve elle-même. Cette étude a pour objectifs d'aider au développement de cette cuve de stockage et à l'optimisation de ses performances.

Le travail qui a été effectué est exposé dans ce mémoire suivant trois chapitres :

- Un premier chapitre correspondant à une étude bibliographique permettant de situer les travaux effectués autour du sujet proposé. Dans cette étude, divers travaux relatifs aux écoulements dans les espaces annulaires, au stockage de l'eau chaude sanitaire dans des cuves de stockage de différents types et aux performances des systèmes d'eau chaude solaire à usage domestique (**ECSD**) ont été consultés pour dégager les meilleures corrélations et les résultats les plus intéressants en relation avec le travail à accomplir.

- Un second chapitre consacré à la modélisation théorique de la cuve de stockage à double enveloppe envisagée. Les différentes équations analytiques nécessaires à la formulation des phénomènes dynamique et thermique dans la cuve de stockage et son enveloppe ainsi que les hypothèses simplificatrices afférentes y sont formulées et expliquées.

- Un troisième chapitre réservé pour une présentation des caractéristiques des différents matériaux utilisés dans notre étude telque le cuivre, l'aluminium, le fer et en dernier lieu, l'acier.

- Un quatrième chapitre, pour la présentation du code numérique qu'on a utilisé pour cette étude.

- Un cinquième chapitre, les divers résultats de notre étude relatifs à quatre dispositifs de fonctionnement de la cuve de stockage construit de différent matériaux (cuivre, aluminium, fer, acier). Les tracés des courbes de températures dans la cuve de stockage et son enveloppe sont représentés et interprétés.

Une conclusion synthétise les principaux résultats obtenus ainsi que les perspectives envisagées suite à la réalisation de cette étude.

Chapitre I

Etude bibliographique

I.1/ Introduction.

Un échangeur de chaleur à double enveloppe est un échangeur dans lequel deux fluides sont séparés par une paroi, généralement de forme cylindrique, à travers laquelle s'effectue un transfert de chaleur entre le fluide externe et le fluide contenu dans la cuve de stockage. Dans le cas des systèmes **ECSD**(**E**au **C**haude **S**olaire à usage **D**omestique représenté sur la **figure(I.1)**), la cuve de stockage contient généralement l'eau à usage domestique, considérée comme le fluide froid à chauffer, et l'enveloppe dans laquelle circule le fluide caloporteur (fluide chaud) contenu dans l'espace situé entre la paroi de la cuve de stockage et la paroi de l'enveloppe extérieure.

Un système **ECSD** est un système constitué d'un collecteur ou capteur solaire, relié par des canalisations à une double enveloppe qui permet de chauffer l'eau à usage domestique qui se trouve à l'intérieur de la cuve de stockage.

Dans les climats froids où il y a un risque de gel du liquide dans le collecteur, on utilise un fluide caloporteur contenant un antigel, généralement du propylène glycol.

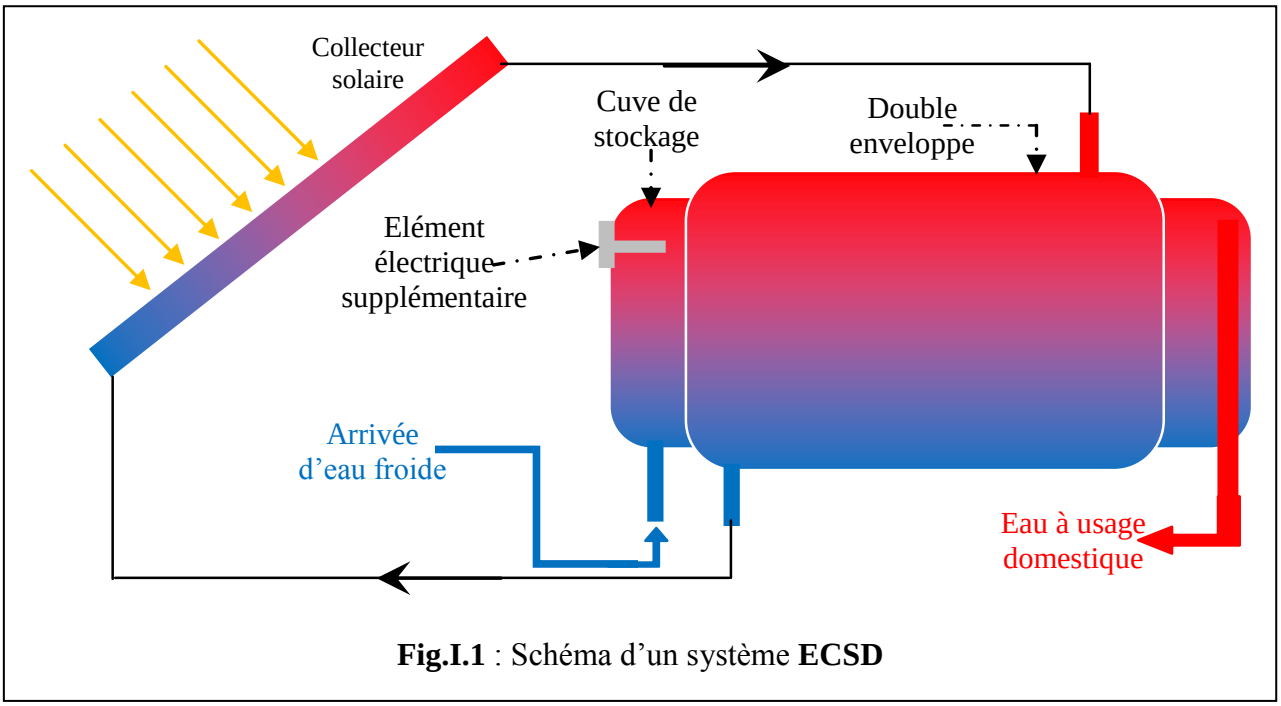


Fig.I.1 : Schéma d'un système **ECSD**

Parfois, on fait appel à une pompe pour assurer la circulation du fluide caloporteur à travers le collecteur solaire on parle alors d'une circulation forcée. Lorsque le fluide caloporteur circule lui-même, sans aucun dispositif particulier, sous l'effet de la gravitation, on parle d'un système thermosiphon.

Généralement, un dispositif supplémentaire est prévu au niveau de la cuve de stockage pour assurer le chauffage de l'eau en cas d'absence ou d'insuffisance des apports solaires. Ce système d'énergie d'alimentation auxiliaire peut être soit une résistance électrique ou un échangeur de chaleur en spirale relié à une chaudière à gazou à mazout.

I.2/ Systèmes de chauffe-eau solaires à faible débit

Les systèmes **ECSD** à faible débit sont diffèrent des systèmes à circulation forcée en ayant un faible débit dans la boucle de captage solaire. Dans les systèmes à circulation forcée, la pompe qui assure la circulation du fluide caloporteur assure généralement un débit de l'ordre de **1,2 l/(min.m²collecteur)** tandis que, dans un collecteur d'un système à thermosiphon, à faible débit, le débit d'écoulement est d'environ **0,2 l/(min.m²collecteur)**.

Dans les systèmes à grands débits d'écoulement, l'utilisation d'une pompe de circulation du fluide caloporteur permet d'obtenir un facteur d'échange de chaleur important au niveau du collecteur **[1]**.

VAN KOPPENet al. (**1979**) **[2]** ont introduit le principe d'écoulement à faible débit car ils s'intéressaient à la performance du système dans son intégralité au lieu de la simple performance du collecteur. En effet, le facteur de dissipation de la chaleur et l'efficacité du capteur solaire sont légèrement réduites en utilisant un débit d'écoulement plus faible mais un débit d'écoulement faible entraîne une augmentation de la température à travers le collecteur. Si le stockage de chaleur est préparé, on peut transférer une grande quantité d'énergie solaire à l'accumulateur de chaleur et donner une grande stratification thermique au fluide, chose qui permet de diminuer l'énergie auxiliaireque l'on fournit au fluide froid du stockage, ce qui augmente le rendement thermique du système.

En outre, avec un stockage d'une très grande stratification et à faible débit d'écoulement, la température de retour au capteur solaire sera abaissée, ce qui accroît à la fois l'efficacité et les périodes de fonctionnement du collecteur.

Les autres avantages d'une utilisation de l'écoulement à faible débit sont notamment la possibilité d'utilisation de conduites de faibles diamètres et de petites pompes de circulation du fluide caloporteur, ce qui peut permettre de réduire les coûts, rendre l'installation plus facile et augmenter la performance thermique.

WUESTLING et al.(**1985**) **[3]** ont fait une comparaison numérique des performances thermiques d'un système à débit d'écoulement très élevé avec une cuve de stockage (en acier) entièrement mélangé et un autre système à faible débit d'écoulement (tuyaux en cuivre) avec une cuve de stockage de très grande stratification (même composants). Les simulations ont montré que pour ce système spécifique la performance thermique est améliorée de près de **37 %**. Il est à remarquer que dans la pratique, le fluide contenu dans la cuve de stockage n'est ni entièrement mélangé, ni entièrement stratifié, ce qui limite la performance précédente.

FURBO et MIKKELSEN (**1987**) **[4]** ont réalisé des mesures sur un système de chauffe-eau solaires avec un débit d'écoulement traditionnel avec un échangeur de chaleur à serpentin (en cuivre) immergé dans la cuve de stockage (en acier) et un système à faible débit d'écoulement (**ECSD**). L'expérience a montré que le système à faible débit d'écoulement a eu une performance thermique de **20 %** plus élevé que le système traditionnel.

Un résumé des avantages de la stratification thermique et de l'utilisation de faibles débits d'écoulement pour les systèmes solaires de production d'eau chaude à usage domestique est donné par **HOLLANDS** et **LIGHTSTONE** (**1989**) **[5]**.

1.3/ Les échangeurs de chaleur dans les systèmes de chauffe-eau solaires.

Comme on a mentionné précédemment, un échangeur de chaleur est nécessaire pour transférer de la chaleur à partir d'eau chaude du fluide caloporteur qui circule dans le collecteur (fluide antigel) vers l'eau de la cuve de stockage. Plusieurs configurations d'échangeur de chaleur sont employées. Parmi les configurations les plus courantes, ont trouve notamment :

- Des échangeurs de chaleur sous forme des bobines ou des tubes à serpentin (en cuivre) qui sont immergés dans la cuve de stockage (en acier) (réalisé par **DAHM** et **al**. en **1998**).

- Des échangeurs de chaleur d'une enveloppe externe et des tubes (en cuivre) avec un fluide pompé à travers le collecteur et la cuve de stockage en acier (entraîné par

convection naturelle) s'écoulant à travers la coquille (réalisé par **DAHL** et **DAVIDSON** en **1998**).

- Des Echangeursde chaleur à double enveloppe, soit sous forme verticale (réalisé par **SHAH** en**2000**) ou sous forme horizontale en acier (réalisé par **MORRISON** et **al.** en**1998**.) **[24]**). Ils se composent d'un gilet étroit annulaire autour d'une cuve de stockage d'eau sanitaire.Le fluide caloporteur s'écoule dans l'enveloppe ou gilet.

Les systèmes avec des tubes à serpentin en cuivre immergés verticalement et des échangeurs de chaleur à double enveloppe sont utilisés principalement dans la partie Nord de l'Europe.

Les systèmes avec coquille externe et les échangeurs de chaleur tubulaire sont principalement utilisés en Amérique du Nord et au Canada.

Les échangeurs de chaleur à double enveloppe horizontale ou verticaleavec des systèmes à thermosiphon (sans pompe decirculation) sont principalement utilisés en Australie et en Europe du Sud.

FURBO (**1993**) **[23]** a réalisée des expériences simultanées avec différents systèmes à faible débit d'écoulement (**ECSD**) afin de comparer leurs performances. Les trois systèmes retenus sont notamment : un système avec un échangeur de chaleur à serpentin en cuivre immergé, un système avec un échangeur de chaleur externe et un système avec un échangeur de chaleur à double enveloppe en acier. Ce dernier a donné des meilleurs résultats. Il a montré qu'il a une bonne performance par apport à son coût.

I.4/ Les différents travaux réalisés

I.4.1/ Le transfert de chaleur par convection naturelle.

NAGENDRA (**1970**) **[6]** a fait une analyse et une étude expérimentale d'un transfert de chaleur par convection libre dans des tubes cylindriques concentriques annulaires en cuivre. Les corrélations du transfert de chaleur qui ont été obtenues à la couche limite pour des plaques parallèles qui ont été vérifiés par des expériences en utilisant des tubes avec un diamètre intérieur de **0,008 m**, un diamètre extérieur de **0,018 m** et une longueur de **0,279 m**, et **0,0254 m** et **0,287 m** respectivement. L'eau était utilisée comme un milieu fluide et le tube intérieur est maintenu à haute température constante autant que le tube externe est maintenu à une température constante inférieure à celle du cylindre interne. Les corrélations obtenues pour le nombre **NUSSELT** s'écrivent :

$$N_{u_L} = \frac{0,48.R_{a_L}}{6830.\left(\frac{L}{d_2}\right)^4.\left(\frac{d_1}{L}\right)+\left(R_{a_L}\right)^{0,75}} \qquad pour \left\{\frac{L}{d_1} < 0,1.\left(R_{a_L}\right)^{0,25}\right\} \quad \textbf{(I-1)}$$

$$N_{u_L} = \frac{1,19.R_{a_L}}{16900.\left(\frac{L}{d_2}\right)^4.\left(\frac{d_1}{L}\right)+\left(R_{a_L}\right)^{0,84}.\left(\frac{d_1}{L}\right)^{0,36}} \qquad pour \left\{0,1.\left(R_{a_L}\right)^{0,25} \le \frac{L}{d_2} < 0,738.\left(R_{a_L}\right)^{0,25}\right\} \quad \textbf{(I-2)}$$

Où L est la longueur du tube, d_1 est le diamètre extérieur du tube interne et d_2 est le diamètre intérieur du cylindre externe.

KUBAIR et **SIMHA** (**1982**) **[7]** ont effectué une analyse d'un transfert de chaleur par convection libre en utilisant l'approche par la double couche limite. Les corrélations ont été comparées avec les expériences en utilisant des tubes en cuivre avec un diamètre intérieur dans une plage de **0,04** à **0,06 m**, un diamètre extérieur de **0,1 m** et une longueur de **0,2 m**. L'eau et le

mercure ont été utilisés comme fluides. Le tube interne est maintenu à une température constante supérieure à celui de l'extérieure. Les corrélations moyennes des nombres de **NUSSELT** sont présentées comme suit:

$$N_{u_w} = 0{,}761.\left(R_{a_w}.\frac{w}{L}\right)^{0{,}283} \qquad pour \left\{10 < R_{a_w}.\frac{w}{L} < 10^3\right\} \qquad \textbf{(I-3)}$$

$$N_{u_w} = 0{,}398.\left(R_{a_w}.\frac{w}{L}\right)^{0{,}284} \qquad pour \left\{10^3 < R_{a_w}.\frac{w}{L} < 10^5\right\} \qquad \textbf{(I-4)}$$

Où L est la hauteur des tubes et w est l'écart entre les rayons des tubes $\left(w = r_{ext} - r_{int}\right)$.

KEYHANI (**1983**) **[8]** a réalisé des mesures de transfert de chaleur par convection libre dans un tube dans lequel le tube interne en cuivre était au niveau du flux de chaleur surfacique constant et le tube externe en aluminium était à une température constante. Les expériences ont été réalisées avec un espace annulaire entre le tube interne d'un diamètre extérieur de **0,0191 m** et unelongueur de **0,876 m**. et le tube externe d'un diamètre intérieur de **0,0826 m** et une longueur de **0,9217 m**. L'air et l'hélium ont été utilisés comme fluides, leurs corrélations ont été corrigées pour un transfert de chaleur par rayonnement. Les corrélations du nombre de **NUSSELT** ont été présentées comme suit:

$$N_{u_w} = 1{,}406.\left(R_{a_w}\right)^{0{,}077} \qquad pour \left\{10^3 < R_{a_w} < 6{,}6.10^3\right\} \qquad \textbf{(I-5)}$$

$$N_{u_w} = 0{,}163.\left(R_{a_w}\right)^{0{,}322} \qquad pour \left\{6{,}6.10^3 < R_{a_w} < 2{,}3.10^3\right\} \qquad \textbf{(I-6)}$$

KHAN et **KUMAR** (**1989**) **[9]** ont fait une étude numérique pour évaluer les effets de rapport du diamètre, $k = r_{ext} / r_{int}$ et le rapport d'aspect **A**où $A = hauteur\ du\ tube / \left(r_{ext} - r_{int}\right)$

Pour un écoulement d'un gaz au sein des tubes. Le tube interne en cuivre a été maintenu à un flux de chaleur uniforme ainsi que le tube externe en cuivre à une température constante. Les résultats ont été obtenus pour :

$$1 \le k \le 15 \quad et \quad 1 \le A \le 10$$

Les corrélations relatives au nombre de **NUSSELT** moyen sont:

$$N_{u_L} = 1{,}58.\left(R_{a_w}\right)^{0{,}29}.k^{\frac{0{,}303}{k}+0{,}316}.A^{-0{,}05} \qquad pour \left\{R_{a_L} < 10^6\right\} \qquad \textbf{(I-7)}$$

Ils ont obtenu également une corrélation simple pour $k > 5$ et $A > 5$en utilisant le diamètre externe du tube interne sur l'échelle de longueur:

$$N_{u_L} = 0{,}455.\left(R_{a_{d_i}}\right)^{0{,}202} \qquad pour \left\{R_{a_{d_i}} < 10^6\right\} \qquad \textbf{(I-8)}$$

ROGERS et **YAO** (**1990** et **1993**) **[10]** ont réalisé une étude sur la stabilité hydrodynamique d'une convection mixte dans un tube. L'étude a été effectuée pour un tube en verre soumis à un flux de chaleur constant appliquée à la paroi interne avec l'isolation de la paroi externe. Pour des Nombres de **Rayleigh** compris entre **100** et **600**, ils ont présenté une corrélation du nombre de **NUSSELT** pour une convection naturelle:

$$N_{u_w} = 1{,}02.\left(R_{a_w}\right)^{0{,}28} \qquad pour \left\{100 < R_{a_w} < 600\right\} \qquad \textbf{(I-9)}$$

DHIMDI et **BOLLE** (**1997**) **[11]**ont déterminé numériquement des coefficients du transfert de chaleur pour une convection naturelle dans des tubes en aluminium avec un grand nombre de **GRASHOF** (G_{rw} **= 8,108**). Ils ont utilisé l'eau comme un milieu fluide eten même temps des différentes températures uniformes sur les deux parois cylindriques. Pour G_{rw} **= 8,108**et pour un rapport d'aspect de **1** (**A = (longueur de tube)/(r_{ext} - r_{int})**), ils ont trouvé la corrélation du nombre de **NUSSELT** suivant:

$$\log\left(N_{u_w}\right) = -0{,}17.\left(\log k\right)^{1{,}82} + 2{,}573 \qquad pour \left\{G_{rw} = 8.10^{8}\right\} \qquad \textbf{(I-10)}$$

Où $k = r_{ext} / r_{int}$.

I.4.2/ Le transfert de chaleur par convection mixte

Au cours des dernières années, l'étude de la combinaison du transfert de chaleur par convection forcée et par convection naturelle (dans des tubes en sens vertical ou horizontal) a pris une grande importance, même si elle est assez complexe à décrire. Dans le cas où le fluide est soumis à un écoulement externe forcé dans la même direction que la force de viscosité (un écoulement ascendant chauffé ou descendant refroidi), le mode du transfert de chaleur est un terme d'assistance ou d'aide de la convection mixte. Dans le cas où le fluide s'écoule de façon forcée à l'extérieur dans la direction opposée à la force de viscosité (un écoulement descendant chauffée ou ascendant refroidie), le mode du transfert de chaleur est un terme d'une convection mixte à contre courant (**GEBHART** et **al.** (**1988**)).

EL-SHAARAWI et **SARHAN** (**1980**) **[12]** ont utilisé des simulations numériques pour analyser le développement d'un écoulement dans un espace annulaire (les conduites supposées en cuivre (avec une paroi interne isotherme et externe isolé), pour des valeurs de **Gr / Re** variant entre **700** et **1500**, et de l'air comme étant un milieu fluide. Le nombre de **GRASHOF** et celui de **REYNOLDS** ont été à la fois basé sur le diamètre hydraulique, avec une température caractéristique égale à la différence entre la température d'entrée et ceux de la paroi isotherme. Lorsque le rapport des rayons était de **0,9**, il a été montré que le transfert de chaleur a augmenté pour aider l'écoulement dû à la réduction de l'épaisseur de la couche limite développée et vice versa pour opposer l'écoulement. Les résultats ont également montré que, comme l'écoulement a développé, le nombre de **NUSSELT** local a convergé vers une valeur très proche de celle attendue pour un écoulement complètement forcé développé entre des plaques parallèles (**Nu = 4,86** (**KAYS** et **CRAWFORD**, **1993**) **[30]**) avec l'une des plaques ayant une température constante et l'extérieure qui est adiabatique et ce, quelle que soit la valeur de **Gr / Re**.

ZENEN (**1985**) **[13]** a effectué une étude numérique d'une convection mixte dans l'espace annulaire d'un plan vertical avec une paroi interne isolée et une paroi externe soit isotherme ou avec une température qui varie avec la hauteur. Cette étude est l'une des études qui considère une température de paroi variable avec la hauteur, même si dans des situations réelles, les températures des parois sont rarement isothermes. Une corrélation du nombre de **NUSSELT** local a été proposée:

$$N_{u_w} = f\left(G_z\right).g\left(St_r\right).\left(\frac{\mu_{entrée}}{\mu_{wm}}\right)^{0{,}116}.\left(G_{r_w}\right)^{a} \qquad \textbf{(I-11)}$$

Où :

- G_z est le nombre de **GRAETZ** donné par $G_z = \dfrac{R_e.P_r.z}{2.w}$,
- z est la distance entre les extrémités du tube,

- $g(St_r)$ est une fonction de la distribution de température de paroi, qui accroit avec le gradient de température,
- G_{rw} est le nombre de **GRASHOF** sur la base de la hauteur du tube et sur la différence entre la température moyenne de paroi et celle d'entrée,
- **a** est une constante.

L'effet de la température dépend de la viscosité dynamique **μ**, qui a été prise en compte par le rapport de viscosité à l'entrée ($\mu_{entrée}$) et la paroi maintenue à une température moyenne (μ_{wm}). Les constantes de corrélation ont été présentées uniquement pour chauffer l'eau lorsque l'écoulement provenant de la partie inferieure du tube où la température d'entrée est inférieure à la température moyenne de paroi. Autres conditions aux limites plus pertinentes pour les échangeurs de chaleur à double enveloppe ont été signalées, mais aucune corrélation n'a été donnée.

IANNELLO (**1988**) [29] a présenté des solutions analytiques pour des convections laminaires mixtes au sein d'un courant vertical entièrement développé de sous-canal d'un faisceau annulaire et des géométries conventionnelles. Les corrélations du nombre de **NUSSELT** d'une convection mixte (basé sur deux espaces annulaires) pour des tubes verticales avec un tube interne chauffé ont été données comme suite:

$$log\left(N_{u_{2w}}\right) = g_i \,.log\left(1+\frac{G_{r_{2w}}}{R_{e_{2w}}}\right) \qquad pour \left\{\frac{G_{r_{2w}}}{R_{e_{2w}}} < 10^4\right\} \qquad \textbf{(I-12)}$$

Une double enveloppe verticale ou un tube vertical peut, à titre d'approximation, être déballés pour former un canal vertical ou une conduite verticale. **LIN** (**1991**) [25] a réalisé une étude numérique d'un écoulement laminaire mixte dans un conduit vertical (en acier) pour un grand débit de départ entre deux plaques planes après une application de différents flux de chaleur à la surface externe de chaque paroi. Il a été constaté que les processus aident à augmenté le nombre de **NUSSELT** tout en s'opposant à des processus qui diminuent ce nombre. Des corrélations ont été données pour aider l'état d'équilibre et l'écoulement à contre courant en termes du nombre de **GRASHOF** et de **REYNOLDS**:

Pour un écoulement à courant parallèle :

$$\frac{N_{u_w}}{N_{u_{forcée}}} = \left(e^{-2x} + 0{,}0184.\left(\frac{G_{r_w}}{R_{a_w}}\right)^{0{,}7463} .z^{0{,}5} .\gamma_H^{-0{,}165}\right)^{\frac{1}{3}} \qquad \textbf{(I-13)}$$

Pour un écoulement à contre courant :

$$\frac{N_{u_w}}{N_{u_{forcée}}} = \left(1+0{,}0012.\left(\frac{G_{r_w}}{R_{r_w}}\right)^{1{,}2272} .z^{0{,}5} .\gamma_H^{-0{,}6126}\right)^{\frac{1}{3}} \qquad \textbf{(I-14)}$$

Où

- $\gamma_H = q_1 / q_2$, $\mathbf{q_1}$ et $\mathbf{q_2}$ sont les flux de chaleur au niveau de la paroi **1** et **2** respectivement,
- **Z** est une dimension axiale de coordonnées, $\mathbf{Z = Re_w.z/w}$,
- **z** est la distance axiale de l'entrée,
- **w** est l'espacement du conduit.

Les deux équations sont pour $\mathbf{Gr_w / Re_w < 1000.Nu_{forcé}}$. Le nombre de **NUSSELT** local stable pour un écoulement par convection purement forcée, qui peut être calculé à partir des équations proposées par **SHAHL.J**. et **FURBOS (1998)[16]**. Ces équations sont données ci-dessous:

$$N_{u_{forcé}} = \begin{cases} 0{,}745.\xi^{-\frac{1}{3}} & \text{pour} \quad \xi \le 0{,}0002 \\ 0{,}745.\xi^{-\frac{1}{3}} - 0{,}2 & \text{pour} \quad 0{,}0002 < \xi \le 0{,}001 \\ 4{,}114 + 4{,}34.\left(10^3.\xi\right)^{-506}.e^{-164\xi} & \text{pour} \quad \xi > 0{,}001 \end{cases} \quad \textbf{(I-15)}$$

Où : $\xi = \left(z/2\right).w.P_e = \left(z/2\right).w.R_e.P_r$

TSAY (en **1994**) **[14]** a présenté une étude numérique de transfert de chaleur par une convection mixte instationnaire dans un passage annulaire vertical résultant d'un changement radical d'un flux de chaleur uniforme traversant la paroi interned'un tube en aluminium.

La paroi externe a été maintenue adiabatique. Il a été constaté que le rapport de conductivité thermique du fluide et celui de la paroi a eu des effets beaucoup plus importants sur le transfert de chaleur que le rapport **Gr / Re**. Le rapport de la conductivité thermique s'écrit :

$$K_{wf} = k_w / k_f \qquad \textbf{(I-16)}$$

Où **k** est la conductivité thermique de la paroi (Wall) K_w et de fluide respectivement K_f.

Quand K_{wf}diminue, le nombre de **NUSSELT** local augmente. C'est un résultat assez significatif, car les moyens que les propriétés de paroi de la cuve de stockage dans un échangeur de chaleur à double enveloppe peuvent être significatives pour déterminer le transfert de chaleur dans cette cuve.

Malheureusement, ces conditions aux limites ne sont pas réalistes dans la pratique pour des échangeurs de chaleur à double enveloppe. Les parois dans un échangeur de chaleur à double enveloppe ne sont pas adiabatiques, et les conditions dans une cuve de stockage à double enveloppe (le stockage interne) sont de sorte transitoire que la température de paroi est uniforme ou le flux de chaleur sera uniforme seulement qu'il se produit dans des cas très rares et dans une courte période. Par conséquent, les références des corrélations du transfert de chaleur pour des cuves à double enveloppe ne sont pas appropriées pour le calcul de la quantité de chaleur transférée à l'intérieur.

En outre, dans notre cas on peut noter qu'aucunes des corrélations référencés dans cette partie pour un transfert de chaleur par convection mixte dans des cuves à double enveloppe sont basées sur la relation entre $\mathbf{Ra / Re^2}$ ou $\mathbf{Gr / Re^2}$ **[15]**.

I.5/ Le transfert de chaleur dans les échangeurs de chaleur à double enveloppe.

BAUR (**1993**) **[26]** a supposé que le transfert de chaleur entre un fluide circulant au niveau d'une double enveloppe et l'eau à usage domestique pourrait être estimé en utilisant la corrélation empirique du transfert de chaleur pour un écoulement laminaire forcé dans la région d'entrée entre deux plaques parallèles développées par **MERCER** (**1967**):

$$N_{u_{2w}}(z) = 4{,}9 + \frac{0{,}0606.\left(Re_{2w}.Pr\frac{2.w}{z}\right)^{1,2}}{1+0{,}0909.\left(Re_{2w}.Pr\frac{2.w}{z}\right)^{0,7}.Pr^{0,1}} \qquad \textbf{(I-17)}$$

Où

- **z** est la distance entre les extrémités de la cuve de stockage,
- **w** est le vide de l'enveloppe (l'espace annulaire),
- **2·w** est le diamètre hydraulique de l'espace annulaire (entre la cuve et le gilet).

Le nombre de Nusselt dans l'équation **(2.19)** est le nombre de **NUSSELT** moyen de départ à la section située à la position **z**. Le nombre de **NUSSELT** local à un nœud **i** est obtenu à partir de:

$$N_{u_i} = \frac{N_u(z_i).z_{i-1} - N_u(z_{i-1}).z_{i-1}}{z_i - z_{i-1}} \qquad \textbf{(I-18)}$$

Les résultats de la simulation de **BAUR** ont été comparés avec les données expérimentales rapportées par **FURBO** et **BERG** en **1990 [30]**. Avec une entrée de l'enveloppe située au sommet de celle de **BAUR**, il a constaté qu'un facteur de correction de **1,8** à été appliqué dans l'équation **(2-19)** afin d'obtenir une comparaison entre le transfert de chaleur mesuré et celui simulé. Ce modèle qui a été proposé par **BAUR** a été mis en œuvre dans le logiciel de simulation **TRNSYS** (**KLEIN**, **1996**) **[27]**.

SHAH et **FURBO** (**1998**)**[16]** ont évalué un transfert de chaleur annulaire dans des échangeurs de chaleur verticaux à double enveloppe (en acier) en utilisant une simulation numérique pour des écoulements au niveau de l'enveloppe et en même temps à l'intérieur de la cuve de stockage. Dans ce cas, le fluide qui circule au niveau de l'espace annulaire était à une température supérieure que celui de la paroi de la cuve interne, ce qui entraine un transfert de chaleur entre les deux fluides (un transfert de chaleur utile à travers la paroi interne et une perte de chaleur vers la paroi externe). Ils ont développé une corrélation du nombre de **NUSSELT** local en termes du nombre de **RAYLEIGH**, et donc basée sur la convection libre:

$$N_{u_i} = 0{,}46.\left(Ra_z.\frac{z}{2.w}\right)^{0,28} \quad pour \;\; w = 0{,}0335\,m \;\; et \;\; Ra_z \le 10^{11} \qquad \textbf{(I-19)}$$

Où **z** est la distance entre les extrémités de l'espace annulaire. La différence de température entre le fluide de l'enveloppe et la paroi de la cuve interne est utilisée comme une caractéristique dans le nombre de **RAYLEIGH** local.

SHAH(**1999**) **[17]**a utilisé deux codes de calcul : **PIV** (**P**article **I**mage **V**ilocimetry) pour étudierla structure d'un écoulement dans une cuve à double enveloppe et le **CFD** (**C**omputational **F**luid **D**ynamics) pour étudier la distribution du flux de chaleur sur la surface d'une cuve à double enveloppe (en acier). Il a démontré que pour une grande température d'entrée de l'enveloppe, il y avait une recirculation de l'écoulement de **20 %**au niveau supérieure de la cuve de stockage. Avec une basse température d'entrée, le courant entrant descend immédiatement vers l'entrée de la cuve et passe le long de ça section inférieure. Ce courant induit une grande zone de recirculation dans les deux tiers supérieurs du volume de la cuve interne. Il a été conclu que les résultats expérimentaux et ceux de simulation indiquent que la distribution de l'écoulement autour de la cuve à double enveloppe est régie par une viscosité axée qui cause une recirculation dans la cuve interne.

SHAH (**1999** et **2000**) **[17]** a continué une « approche dynamique» et il a développé une nouvelle corrélation du nombre de **Nu-Ra** basée sur une simulation numérique:

$$N_{u_z} = 0{,}28.\left(\frac{w}{r_i}\right)^{-0{,}63}.\left(Ra_z.\frac{z}{H}\right)^{0{,}28} \quad pour \quad Ra_z < 10^{10} \qquad \textbf{(I-20)}$$

Où **H** est la hauteur de la cuve à double enveloppe en acier et $\mathbf{r_i}$ le rayon extérieur de la paroi interne de cette cuve.

L'équation **(I-20)** est valable pour une gamme plus large des modèles géométriques de la cuve de stockage à double enveloppe que l'équation **(I-19)**.

Les équations **(I-19)** et **(I-20)** ne sont valables que pour les échangeurs de chaleur à double enveloppe avec une entrée de l'enveloppe située au sommet.

SHAH (**1999**) **[17]**a comparé les flux de chaleur calculés en utilisant la corrélation de l'équation **(I-20)** avec ceux calculés à l'aide du **CFD**, il a constaté que dans de nombreux cas la corrélation s'est comportée comme prévu par les simulations **CFD**. Cependant, certaines différences significatives ont eu lieu pour les lacunes de la cuve à double enveloppe, une hauteur différente par rapport au diamètre, et pour un grand débit d'écoulement dans la cuve (**SHAH**, **1999**). Ces inexactitudes peuvent indiquer que le transfert de chaleur dans la cuve à double enveloppe peut être par convection mixte, et donc le nombre de **NUSSELT** ne sera qu'en fonction du nombre de **RAYLEIGH** et du nombre de **REYNOLDS** à la fois.

I.5.1/ Transfert de chaleur dans les échangeurs de chaleur à double enveloppe horizontaux

MORRISON (**1998**, **1999**) **[18]** a utilisé l'injection d'un colorant pour la visualisation de l'écoulement et une modélisation avec **CFD**. Il a étudié la structure de l'écoulement et la stratification de la cuve de stockage en acier avec un orifice d'entrée situé au fond. La structure de l'écoulement dépend de la température d'entrée qui est relative à la stratification thermique de la cuve de stockage interne, et que la majorité du phénomène du transfert de chaleur se passe au niveau de la partie supérieure de la cuve.

L'orifice d'entrée de l'enveloppe des échangeurs de chaleur à double enveloppe horizontaux se trouve normalement au fond de l'enveloppe pour éviter la circulation inverse pendant la nuit dans la boucle à thermosiphon (**ROSENGARTEN**, **1999**) **[19]**. Comme **MORRISON** a conclu que l'entrée du bas ne donne pas une grande stratification thermique, **ROSENGARTEN** (**2000**) **[20]** a étudié plusieurs configurations de la double enveloppe d'un échangeur de chaleur à double enveloppe horizontale avec des entrées différentes. Il a comparé ces résultats avec ceux de l'entrée traditionnelle du bas utilisé en écoulement perpendiculaire à la paroi de la cuve de stockage. Avec une entrée située en bas, l'écoulement se passe directement vers la sortie (qui est placée elle-même en bas) au lieu de s'étendre au-dessus de la paroi de la cuve de stockage. La quantité de chaleur transférée a été de **10** à **15 %** environ inférieure à celle du modèle avec une entrée en haut et cela est dû principalement à l'absence d'une région d'un jet incidente. La configuration d'entrée en haut a été trouvé comme avantage avec des températures d'entrée élevées parce que le fluide chaud d'entrée ne doit pas traverser la zone inférieure de l'enveloppe de sorte qu'il ya un flux de chaleur plus élevée dans la partie supérieure de cette enveloppe.

ROSENGARTEN (**2001**) **[20]** a montré que l'effet de courbure sur des flux par convection mixte ainsi que le transfert de chaleur qui se passe au niveau des espaces annulaires étroits ont été négligé. Ainsi, il a utilisé un échangeur de chaleur à double enveloppe vertical en acier avec un gilet rectangulaire pour étudier la structure d'un écoulement et le transférer de chaleur dans l'espace

annulaire à l'aide du **PIV** et même du **CFD**. L'une des parois de la cavité est adiabatique et l'autre paroi est soumise à un transfert de chaleur avec des conditions aux limites différentes (isothermique et que la température varie avec l'altitude de la cavité). Il a constaté que le flux de chaleur locale (et le nombre de **NUSSELT** local) dépend de la convection forcée et naturelle et le flux de chaleur est donc en régime de convection mixte. Il n'ya pas de corrélation du nombre de **NUSSELT** local qui a été développé. Au lieu de cela, il a développé une corrélation du nombre de **NUSSELT**moyen où il a utilisé la différence de température entre l'entrée et la paroi pour un transfert de chaleur et en prenant un paramètre de correction de la stratification en compte, ce nombre de **NUSSELT** est donné par:

$$N_{u_w} = Re_w \,.\, Pr \,.\, St \,.\, \frac{W}{L}\left(1 - exp\left(\frac{-1}{Re_w \,.\, Pr} \,.\, \frac{363.L}{k}\right)\right) \qquad \textbf{(I-21)}$$

Où **L** est la longueur de la cavité, **k** est la conductivité thermique du fluide de la double enveloppe **St** est le paramètre de correction de la stratification (dépend du nombre de **REYNOLDS** et de l'efficacité de la stratification).

I.5.2/ Transfert de chaleur à l'intérieur de la cuve de stockage

À l'intérieur de la cuve de stockage d'un échangeur de chaleur à double enveloppe le mouvement du fluide ainsi que le transfert de chaleur est régis par le débit d'écoulement.

SHAH (**1999**, **2000**) **[17]** à développé une corrélation locale **Nu-Ra** pour un transfert de chaleur à partir d'une paroi d'une cuve de stockage d'eau à usage domestique

$$N_{u_z} = \left(4{,}501 - \frac{3{,}103.D}{H}\right).\left(Ra_z \,.\, \frac{z}{H}\right)^{0{,}19} \qquad pour \qquad Ra_z < 10^{11} \qquad \textbf{(I-22)}$$

Où :

- **z** est la distance entre les sommets de la cuve de stockage ;
- **D** le diamètre de la cuve de stockage ;
- **H** est la hauteur de la cuve.

SHAH (**1999**) à comparé des flux de chaleur calculés en utilisant une corrélation de l'équation **(I-22)** à ceux calculés en utilisant le **CFD**, il a constaté que dans de nombreux cas la corrélation s'est comporté comme prévu par les simulations **CFD**. Cependant, les flux thermiques calculés par la corrélation ne correspondent parfaitement pas à la forme des flux de chaleur prédit par le **CFD**.

OLIVESKI (**2003**)**[21]** a fait une analyse numérique et expérimentale des pertes thermiques pour une cuve de stockage vertical en acier soumise à un transfert de chaleur par convection naturelle. Deux corrélations du nombre de **NUSSELT** moyen, pour des volumes de **0,1 m³** et **0,2 m³** respectivement, ont été présentées:

$$N_u\left(\frac{H}{D}\right)_{v=0,1}^{-0,3} = \left(9{,}40739.U'^{0{,}288329}\right).\left\{1000.\left(\overline{T} - T_{amb}\right)^{-1} - 20\right\}^{(0{,}0098884.U' - 0{,}189428)} \qquad \textbf{(I-23)}$$

$$N_u\left(\frac{H}{D}\right)_{v=0,2}^{-0,3} = \left(10{,}6039.U'^{0{,}310719}\right).\left\{1000.\left(\overline{T} - T_{amb}\right)^{-1} - 20\right\}^{(0{,}013052.U' - 0{,}224677)} \qquad \textbf{(I-24)}$$

Où :

- $\overline{T}$ est la température moyenne du fluide,
- U' est le coefficient du transfert thermique global donné par :

$$U' = \frac{1}{\frac{e}{k} + \frac{1}{h_{ext}}} \quad \textbf{(I-25)}$$

Où :

- $e$est l'épaisseur de l'isolant,
- k est la conductivité thermique du matériel d'isolation,
- h_{ext} est la convection externe de la cuve de stockage.

Les équations **(I-23)** et **(I-24)** sont valables pour un rapport entre la hauteur et le diamètre compris entre **1** et **2,5** et ils sont limités à prédire la perte de chaleur et par conséquent ils ne peuvent pas être utilisés pour prédire le transfert de chaleur à partir du fluide de la double enveloppe. L'équation **(I-22)** développée par **SHAH** (**1999**, **2000**) peut être utilisé pour prédire à la fois la perte de chaleur et le transfert de chaleur à partir du fluide de l'enveloppe.

I.6/ Chauffe eau solaire individuel

Une installation solaire classique de Chauffe Eau Solaire Individuel (CESI) est présentée à la Figure I.2. Typiquement, un fluide caloporteur circule grâce à une pompe dans les capteurs solaires pour récupérer l'énergie solaire. Le ballon solaire est un stockage en Eau Chaude Sanitaire (ECS) : un échangeur est alors essentiel pour transmettre l'énergie récupérée.

Cette transmission de chaleur s'effectuant ici via l'échangeur constitue la charge du ballon. A l'inverse, la consommation d'ECS constitue la décharge du ballon.

La pompe est associée à la régulation car son fonctionnement est directement lié aux conditions météorologiques. Une pompe à vitesse variable est de plus en plus utilisée dans les installations solaires. Elle permet en effet une meilleure récupération de l'énergie solaire disponible. Ainsi, une vitesse de pompe importante permet de transmettre rapidement l'énergie dans le cas d'une ressource solaire importante tandis qu'une plus petite vitesse permet de profiter d'une ressource solaire moyenne. La pompe est l'élément caractéristique d'une installation à circulation forcée.

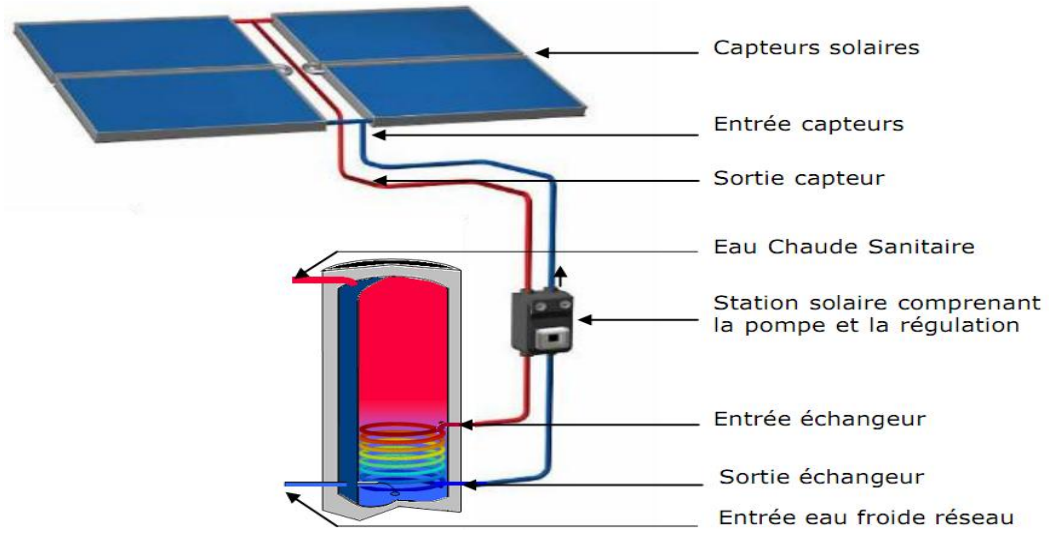


Fig.I.2 : Présentation d'une installation solaire **ECSD**

Différents types de capteurs solaires thermiques sont actuellement présents sur le marché. Pour une utilisation de l'énergie solaire dans le bâtiment, 2 types de capteurs cohabitent :

Alors que les capteurs sous vide possèdent tous un revêtement sélectif, les capteurs plans peuvent ou non disposer de ce revêtement destiné à diminuer les pertes par rayonnement.

La Figure I.4 représente les différences de rendements entre les différents capteurs obtenus par essais réalisés selon la norme NF EN 12975-2 où le rendement est donné par :

Les capteurs plans



les tubes sous vide



Fig.I.3 :Exemple de panneaux solaires thermiques

$$\eta = \eta_0 - a_1 \frac{(T_m - T_a)}{W} - a_2 \frac{(T_m - T_a)^2}{W} \quad \textbf{(I-26)}$$

Avec :

T_m La température moyenne du capteur (moyenne entre la température d'entrée et la température de sortie du capteur) (°C).

T_a La température ambiante dans l'environnement du capteur (°C).

W La puissance de l'irradiation solaire mesurée dans le plan du capteur (W/m²).

η_0 Le rendement ambiant du capteur.

$a_1$eta_1 Coefficient de transfert thermique.

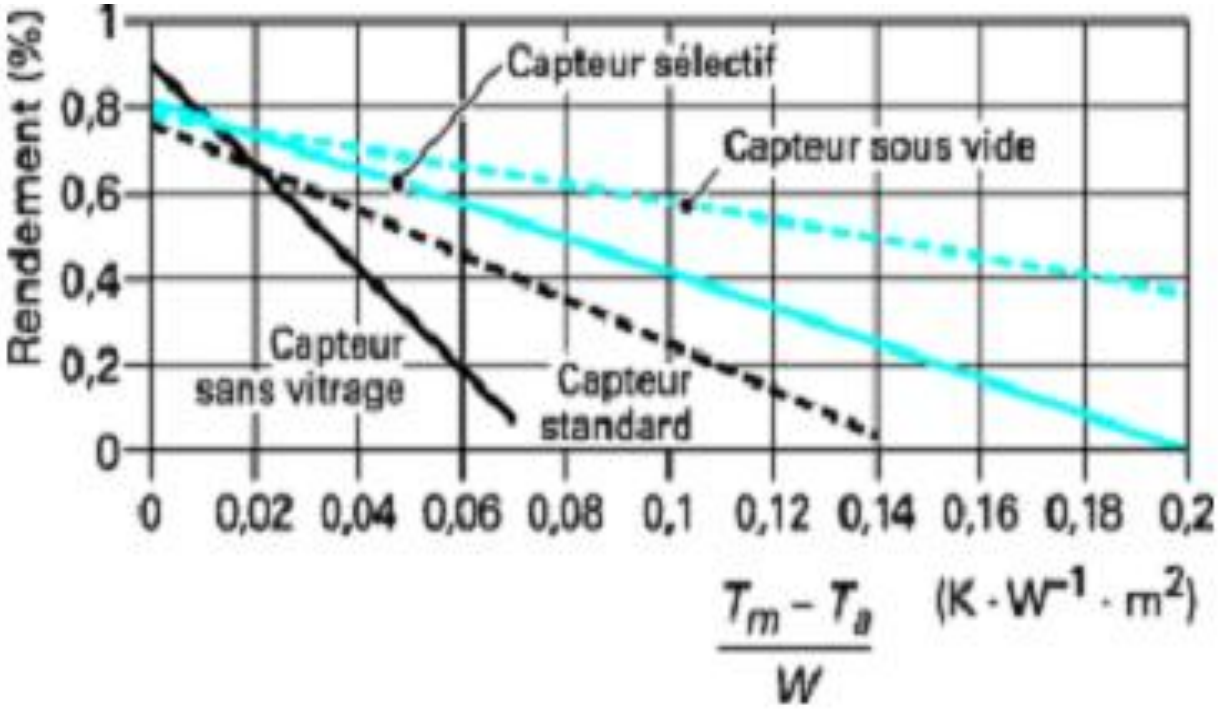


Fig.I.4 :Courbes caractéristiques des rendements des capteurs

I.7/Conductivité thermique des substances métalliques

La conductivité thermique est une grandeur physique qui caractérise l'aptitude d'un corps à conduire la chaleur. Plus la conductivité thermique d'un matériau est élevée, plus celui-ci conduit la chaleur, et donc moins il set isolant. Dans le système international d'unités, la conductivité thermique est exprimée en watts par mètre par kelvin ($w .m^{-1}.k^{-1}$). Elle dépend principalement de la nature du matériau et de la température mais d'autres paramètres tels que l'humidité et la pression interviennent également.

Le tableau ci-dessous représente la conductivité thermique de certains métaux que l'on veut comparer pour savoir qu'el est le meilleur suceur de chaleur.

Métaux	**Conductivité thermique (w/m °c)**
Cuivre	386
Aluminium	237
Fer	80
Acier	45
Zinc	116

Tableau (I.1) : Conductivité thermique des substances Métalliques

I.8/Conclusion

A la fin de ce chapitre, on déduit que tous les travaux de recherche qui s'intéressent au transfert thermique entre deux fluides à des différentes températures ont vu la lumière depuis longtemps avec des résultats obtenus pour améliorer notre mode de vie en modifiant les ressources de l'énergie que l'on consomme.

CHAPITRE II

MODELISATION MATHEMATIQUE

MODELISATION MATHEMATIQUE

II-1) Introduction

La modélisation mathématique du fonctionnement d'un système de chauffage d'eau solaire est assez compliquée et difficile à résoudre. Dans ce chapitre, on présente deux modèles mathématiques décrivant le comportement thermique de la cuve de stockage à double enveloppe.

II-2) Les équations qui gouvernent le mouvement

Les équations qui gouvernent l'écoulement du fluide pour un régime laminaire ainsi que le transfert de chaleur sont résumées dans la partie ci-dessous.

L'ensemble de base des équations nécessaires pour résoudre un écoulement laminaire du fluide et du transfert de chaleur comprend l'équation de continuité, l'équation dynamique et celle de l'énergie.

Les indices répétés dans un terme d'une équation impliquent une sommation de ce terme au cours des trois valeurs de *k* (convention de sommation).

L'équation de continuité:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i) = 0 \qquad \textbf{(2-1)}$$

L'équation dynamique:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j}\left(\rho u_j u_i\right) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} + \rho g_i \qquad \textbf{(2-2)}$$

Où $\boldsymbol{\tau_{ij}}$est le tenseur des contraintes:

$$\tau_{ij} = \mu\left[\left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i}\right) - \left(\frac{2}{3}\frac{\partial u_k}{\partial x_k}\right)\delta_{ij}\right] \qquad \textbf{(2-3)}$$

L'équation de l'énergie:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho H) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i H) = \frac{\partial}{\partial x_j}\left[k\frac{\partial T}{\partial x_j}\right] + \frac{\partial p}{\partial t} \qquad \textbf{(2-4)}$$

Où

g_i Gravité, $g_i = (g_x, g_y, g_z)$.**[m/s²]**

H Enthalpie totale, $H = h + ½\ u_i^{\ 2}$.**[J/kg]**

h Enthalpie thermodynamique, h = h (T, p).**[J/kg]**

k Conductivité thermique.**[W/(m·K)]**

p Pression.**[kg/(m·s²)]**

T Température.**[K]**

t Temps. **[s]**

u_i Vitesse du fluide, $u_i = (u, v, w)$.**[m/s]**

μ Viscosité dynamique.**[kg/(m·s)]**

ρ Masse volumique.**[kg/m³]**

II-3) L'utilisation de l'approximation de Boussinesq

La convection naturelle joue un rôle important dans le transfert de chaleur et même pour un écoulement du fluide au niveau des échangeurs de chaleur à double enveloppe.

Les simulations des transferts de chaleur par convection naturelle ont souvent des problèmes de convergence, les termes de viscosité conduisent à un couplage entre les équations de l'énergie et celle du mouvement à travers la densité qui dépend de la température, on utilise l'approximation de Boussinesq qui a été appliquée afin d'obtenir une convergence plus rapide.

L'approximation de Boussinesq traite la densité comme étant une valeur constante dans toutes les équations résolues, sauf pour le terme de viscosité dans l'équation du mouvement (le dernier terme de l'équation **(2-2)**):

$$(\rho - \rho_0)g_i \approx -\rho_0 \beta (T - T_0) g_i \qquad \textbf{(2-5)}$$

$$\Downarrow$$

$$\rho = \rho_0 \left(1 - \beta (T - T_0)\right) \qquad \textbf{(2-6)}$$

Où

$\boldsymbol{T}$ Température del'écoulement.**[K]**

$\boldsymbol{T_0}$ Température de fonctionnement de l'écoulement.**[K]**

$\boldsymbol{\beta}$ Coefficient de dilatation thermique.**[1/K]**

$\boldsymbol{\rho}$ Densité variable.**[kg/m³]**

$\boldsymbol{\rho_0}$ Densité (constante) à la température de fonctionnementT_0.**[kg/m³].**

L'équation **(2-6)** peut être utilisée pour éliminer **ρ** du terme de la viscosité dans l'équation de mouvement. Cette approximation est valable tant qu'il ya de petits changements des densités réelles, plus précisément, l'approximation de **BOUSSINESQ** est valable lorsque

$$\beta(T - T_0) \ll 1.$$

II-4) Modélisation du coté turbulent

Les écoulements turbulents sont caractérisés par des champs de vitesses fluctuants. Ces fluctuations mélangées transportent de très importantes quantités telles que le mouvement et l'énergie. Ces fluctuations peuvent être à une petite échelle et en même temps à une grande fréquence. Au lieu de cela, les équations instantanées (exactes) qui gouvernent le mouvement peuvent prendre du temps pour les résoudre. Toutefois, les équations modifiées contiennent d'autres variables inconnues, et des modèles de turbulence sont nécessaires pour déterminer ces variables en termes de quantités connues.

A l'aide de la méthode de la moyenne de **REYNOLDS**, les variables de solution dans les équations de **NAVIER-STOKES** instantanées (exacte) sont décomposés en une valeur moyenne dans le temps et en une composante fluctuante. La composante de vitesse dans la direction **x** peut être écrite sous la forme suivante:

$$u = \bar{u} + u' \qquad \textbf{(2-7)}$$

Où

$$\bar{u} = \frac{1}{t}\int_0^t u\,dt \qquad \textbf{(2-8)}$$

et

$$\overrightarrow{u} = \frac{1}{\Delta t}\int_{t_0}^{t_0+\Delta t} u' \, dt \qquad \textbf{(2-9)}$$

De même pour d'autres paramètres comme la vitesse dans la direction **y** et **z**, la pression ainsi que la température et l'enthalpie:

$$\emptyset = \overline{\emptyset} + \emptyset' \qquad \textbf{(2-10)}$$

Où ∅ est un paramètre physique.

La figure ci-dessous montre la relation entre **u**, **ū**et **u'**.où T est la température et t représente le temps.

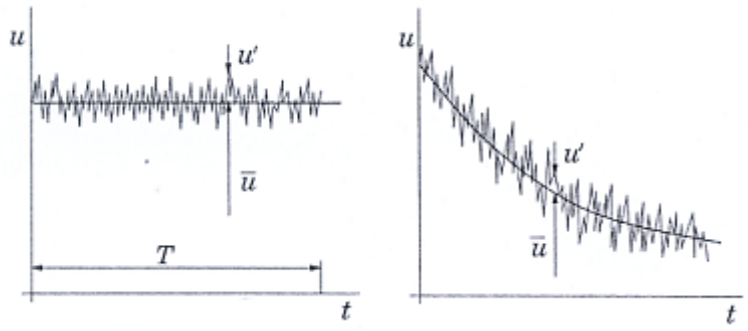


Figure (2-1): Les relations entre **u**, **ū**et **u'** pour un flux constant (à gauche) et un écoulement instationnaire (à droite)

Les valeurs moyennes du nombre de **REYNOLDS** peuvent être remplacées dans les équations de **NAVIER-STOKES**:

Equation de continuité au niveau du système:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \overline{u_i}) = 0 \qquad \textbf{(2-11)}$$

Equation de mouvement au niveau du système:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \overline{u_i}) + \frac{\partial}{\partial x_j}\left(\rho \overline{u_j u_i}\right) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j}\left(\tau_{ij} - \rho \overline{\mathrm{u_i' u_j'}}\right) + \rho \mathrm{g}_i \qquad \textbf{(2-12)}$$

Equation de l'énergie au niveau du système:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \bar{H}) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \overline{\mathrm{u_i}}\,\overline{\mathrm{H}}) = \frac{\partial}{\partial x_j}\left[k_{\mathrm{eff}} \frac{\partial \bar{T}}{\partial x_j}\right] + \frac{\partial \bar{p}}{\partial t} \qquad \textbf{(2-13)}$$

Les équations **(2-11)** et **(2-13)** sont appelés **REYNOLDS M**oyennées des équations de **NAVIER-STOKES**(**RMNS**).

Des termes supplémentaires apparaissent représentant les effets de la turbulence au niveau de la cuve de stockage.

C'est($\boldsymbol{\rho \overline{u_i' u_j'}}$), appelée contraintes de **REYNOLDS** que doit être modélisé pour résoudre l'équation **(2-12)**. Dans l'équation **(2-13)** $\mathbf{k_{eff}}$ représente la conductivité thermique effective qui dépend du modèle de la turbulence utilisé:

$$k_{\mathrm{eff}} = k + k_T = k + \frac{c_p \mu_T}{\mathrm{Pr}_T} \qquad \textbf{(2-14)}$$

Où $\mathbf{Pr_T}$ est l'énergie turbulente du nombre de **PRANDTL**($\mathbf{Pr_T = 0,85}$), et $\boldsymbol{\mu_T}$ est la viscosité turbulente (elle sera définie dans l'équation **(2-18)**).

L'enthalpie totale moyenne est donnée par:

$$\bar{H} = \bar{\mathrm{h}} + \frac{1}{2}\bar{\mathrm{U}}^2 + \frac{1}{2}\overline{\mathrm{U}'^2} \qquad \textbf{(2-15)}$$

Où le dernier terme est appelé" l'énergie cinétique de la turbulence.

Les contraintes de **REYNOLDS** décrivent l'influence des fluctuations sur la distribution de l'écoulement moyen et le motif des modèles de la turbulence est d'obtenir une description de ces contraintes. Dans ce projet, on utilise le modèle standard **k-ω**.

Le modèle **k-ω** utilisé par **SOLID WORKS** a été développé par **WILCOX** en **1998**. Ce modèle est un modèle empirique basé sur le modèle des équations du transport de l'énergie cinétique turbulente (**K**) et le débit de dissipation spécifique (**ω**), qui peut également être considéré comme le rapport de **ε** à **k**. où **ε** est le débit de dissipation.

L'énergie cinétique turbulente **k**, et le débit de dissipation spécifique **ω**, sont obtenus à partir des équations de transport suivantes:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k \bar{\mathrm{u}_i}) = \frac{\partial}{\partial x_j}\left(\left(\mu + \frac{\mu_T}{\sigma_k}\right)\frac{\partial k}{\partial x_j}\right) + 2\mu_T S_{ij} S_{ij} - \rho\beta^* \mathrm{f}_{\beta^*} k\omega \qquad \textbf{(2-16)}$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \omega) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \omega \bar{\mathrm{u}_i}) = \frac{\partial}{\partial x_j}\left(\left(\mu + \frac{\mu_T}{\sigma_\omega}\right)\frac{\partial \omega}{\partial x_j}\right) + 2\alpha\frac{\omega}{k}\mu_T S_{ij} S_{ij} - \rho\beta\, \mathrm{f}_\beta\, \omega^2 \qquad \textbf{(2-17)}$$

Dans ces équations, le dernier terme représente la dissipation de **k** et **ω** due à la turbulence, et l'avant dernier terme représente la génération de l'énergie cinétique turbulente due aux gradients de la vitesse moyenne (pour l'équation (**2-16**)) et la génération de **ω** (pour l'équation (**2-17)**).$\boldsymbol{\sigma_k}$et$\boldsymbol{\sigma_\omega}$ sont les nombres de **PRANDTL** turbulents pour **k** et **ω**, respectivement ($\boldsymbol{\sigma_k}$**= 2,0**). Le modèle **k-ω** introduit la viscosité turbulente$\boldsymbol{\mu_T}$, pour modéliser l'écoulement turbulent:

$$\mu_T = \frac{\rho k}{\omega} \qquad \textbf{(2.18)}$$

Pour finaliser les équations **(2-16)** et **(2-17)**on définit les coefficients suivants:

$$\alpha = \frac{13}{25}, \beta = \frac{9}{125}, \beta^* = \frac{9}{100} \quad \textbf{(2-19)}$$

$$\chi_\omega \equiv \left|\frac{\Omega_{ij}\,\Omega_{jk}\,\Omega_{ki}}{(\beta^*\omega)^3}\right|, f_\beta = \frac{1+70\chi_\omega}{1+80\chi_\omega} \quad \textbf{(2-20)}$$

$$f_{\beta^*} = \begin{cases} 1, & \chi_k \le 0 \\ \frac{1+680\chi_k^2}{1+400\chi_k^2}, & \chi_k > 0 \end{cases}, \quad \chi_k \equiv \frac{1}{\omega^3}\frac{\partial k}{\partial x_j}\frac{\partial \omega}{\partial x_j} \quad \textbf{(2.21)}$$

$$S_{ij} = \frac{1}{2}\left(\frac{\partial \overline{u_i}}{\partial x_j} + \frac{\partial \overline{u_j}}{\partial x_i}\right), \Omega_{ij} = \frac{1}{2}\left(\frac{\partial \overline{u_i}}{\partial x_j} - \frac{\partial \overline{u_j}}{\partial x_i}\right) \quad \textbf{(2-22)}$$

Le modèle **k-ω** est expliqué plus en détail dans **SOLIDWORKS2012**.

La résolution des équations **(2-16)** et **(2-17)** pour **k, ω** ainsi que $\boldsymbol{\mu_T}$ se fait numériquement en fonction de **k** et **ω**, les contraintes de **Reynolds** peuvent être calculées à l'aide des hypothèses de **Boussinesq** concernant le nombre de **Reynolds** en relation avec le gradient de la vitesse moyenne:

$$-\rho\overline{u_i' u_j'} = \mu_T\left(\frac{\partial \overline{u_i}}{\partial x_j} + \frac{\partial \overline{u_j}}{\partial x_i}\right) - \frac{2}{3}\left(\rho k + \mu_T \frac{\partial u_i}{\partial x_i}\right)\delta_{ij} \quad \textbf{(2-23)}$$

Remarque :

Le modèle **k-ω** a été choisi comme un modèle de turbulence au lieu du modèle **k-ε** le plus connue, où on résous l'équation du débit de dissipation (**ε**) au lieu de résoudre celle du débit de dissipation spécifique (**ω**) le modèle **k-ε** est d'abord valable pour un flux turbulent de base (c.à.d. L'écoulement dans les régions plus proches des parois), et d'autre part le modèle **k-ω** est désigné pour être appliqué à travers la couche limite, à condition que la résolution du maillage au voisinage de la paroi est suffisante (**SOLIDWORKS**, **2012**).

L'écoulement dans la cuve de stockage (la cuve interne) est complètement dépendant de celui qui se passe au voisinage de sa paroi (par la convection naturelle).

II-5) Discrétisation et solution des algorithmes

Dans les calculs numériques, on utilise différentes méthodes de discrétisation. **SOLIDWORKS** utilise une technique de volume de contrôle qui converti les équations qui gouvernent le mouvement en des équations algébrique que l'on peut résoudre numériquement. Cela implique, premièrement, l'intégration des équations au dessus d'un volume de contrôle de sorte que les valeurs dépendantes variables situes au limites du volume de contrôle. Ensuite les variables sont interpolées pour obtenir les équations des différences finies aux valeurs de nœud. Pour cette interpolation on a utilisé un **schéma upwind** de second ordre que vous allez le trouver en détail en annexe **E**.

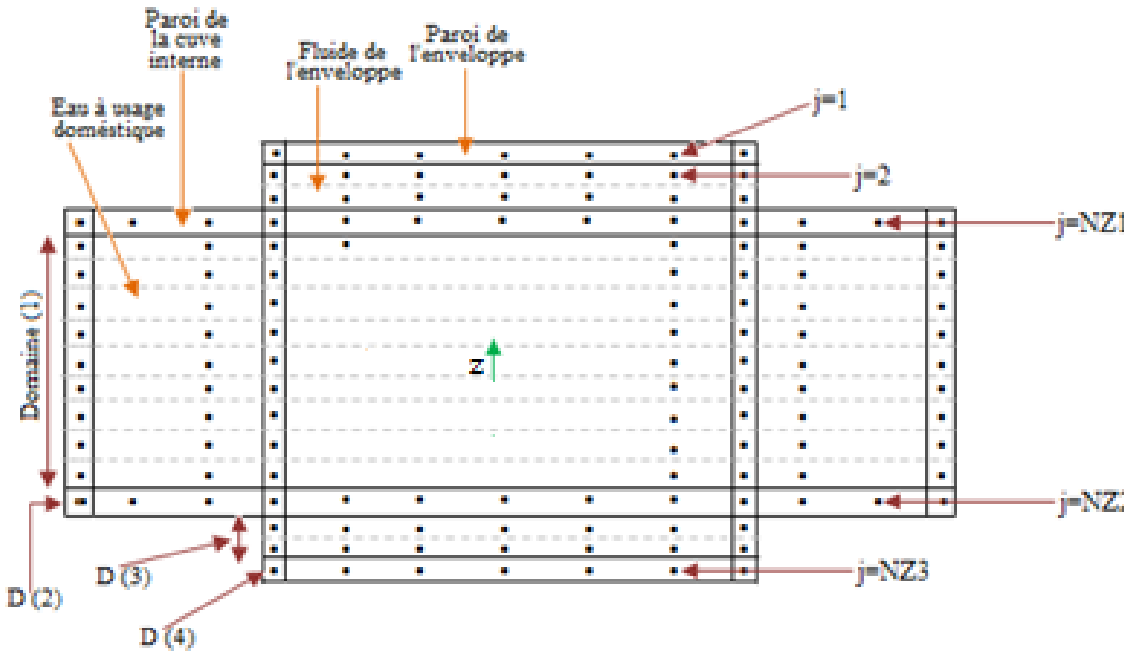


Fig. (II.2) :les volumes de contrôle dans le modèle de stockage thermique

Les méthodes utilisées pour calculer la pression à chaque point et pour corriger les composantes de la vitesse est la **PISO** algorithme instationnaire (**PISO** = **P**ressure-**I**mplicit with **S**pliting of **O**perators), qui fait partie de la famille d'algorithmes **SIMPLE** (**PATANKAR**, **1980).**

II-5) Le modèle numérique

La modélisation d'un accumulateur de chaleur en " **n** " volumes de contrôle le long de la cuve à double enveloppe, avant de simuler la stratification thermique dans la cuve interne. Le modèle d'accumulateur de chaleur est illustré dans la **figure (II-2)**. Le modèle est divisé en **NZ3** couches horizontales pour calculer les différentes températures horizontaux, chacune de ces couches est divisée en **2** à **4** volumes de contrôle. le premier volume est pour l'eau qui s'écoule à l'intérieur de la cuve interne, le deuxième est pour la paroi de la cuve interne, le troisième au niveau de la paroi séparatrice et le quatrième volume est destiner pour le fluide qui circule au niveau de l'espace annulaire. On a considéré une température uniforme pour chacun de ces volumes de contrôle.

Le bilan énergétique pour chaque volume de contrôle, (**i**, **j**), peut être présenté comme suit:

$$\Delta E_{i,j} = E_s + E_{conv} + E_{mix} + E_{diff} + E_{aux} - E_{pert} - E_{pré} \qquad \textbf{(2-24)}$$

Où

$\Delta \mathbf{E_{i,j}}$ Energie stockée dans le volume de contrôle # (**i, j**)**[J].**

E_s Energie solaire entrante dans le volume de contrôle # **(i, j**) **[J].**

E_{conv} Energie convective entrante dans le volume de contrôle # (**i, j**) **[J].**

E_{mix} Energie entrante dans le volume de contrôle # (**i, j)** en raison de mélange **[J].**

E_{diff} Energie de diffusion entrante dans le volume de contrôle # (**i, j**) due àla conduction thermique entre les volumes de contrôle **[J].**

E_{aux} Energie auxiliaire fournie au volume de contrôle # (**i, j**) **[J].**

E_{pert} Perte thermique du volume de contrôle # (**i, j**) **[J].**

$E_{pré}$ Energie prélevée du volume de contrôle # (**i, j**) **[J].**

Remarque

L'énergie du mélange, $\mathbf{E_{mix}}$, est l'énergie transportée entre deux couches très minces du mélange à des températures différentes.

L'énergie de diffusion, $\mathbf{E_{diff}}$, l'énergie transportée entre les volumes de contrôle due à la conduction thermique (seulement entre deux fluides ou entre deux parois).

Un système d'énergie auxiliaire (un échangeur de chaleur raccordé à un brûleur à gaz ou à huile, ou à un élément électrique chauffant) est souvent placé dans la partie supérieure de la cuve interne pour maintenir l'eau à une température stable. L'écoulement du fluide au niveau de la double enveloppe se passe par pas de temps. Le pas de temps, **dt**, est calculé de sorte qu'à chaque pas de temps, l'écoulement se déplace de la zone du volume de contrôle à travers tout le fluide. En outre, on suppose que l'entrée du fluide est toujours équilibrée thermiquement (sans créer de mélange). Par conséquent, à la fin de chaque pas de temps, le fluide est balayé du haut en bas.

Les équations différentielles des bilans énergétiques pour tous les volumes de contrôle sont donnés:

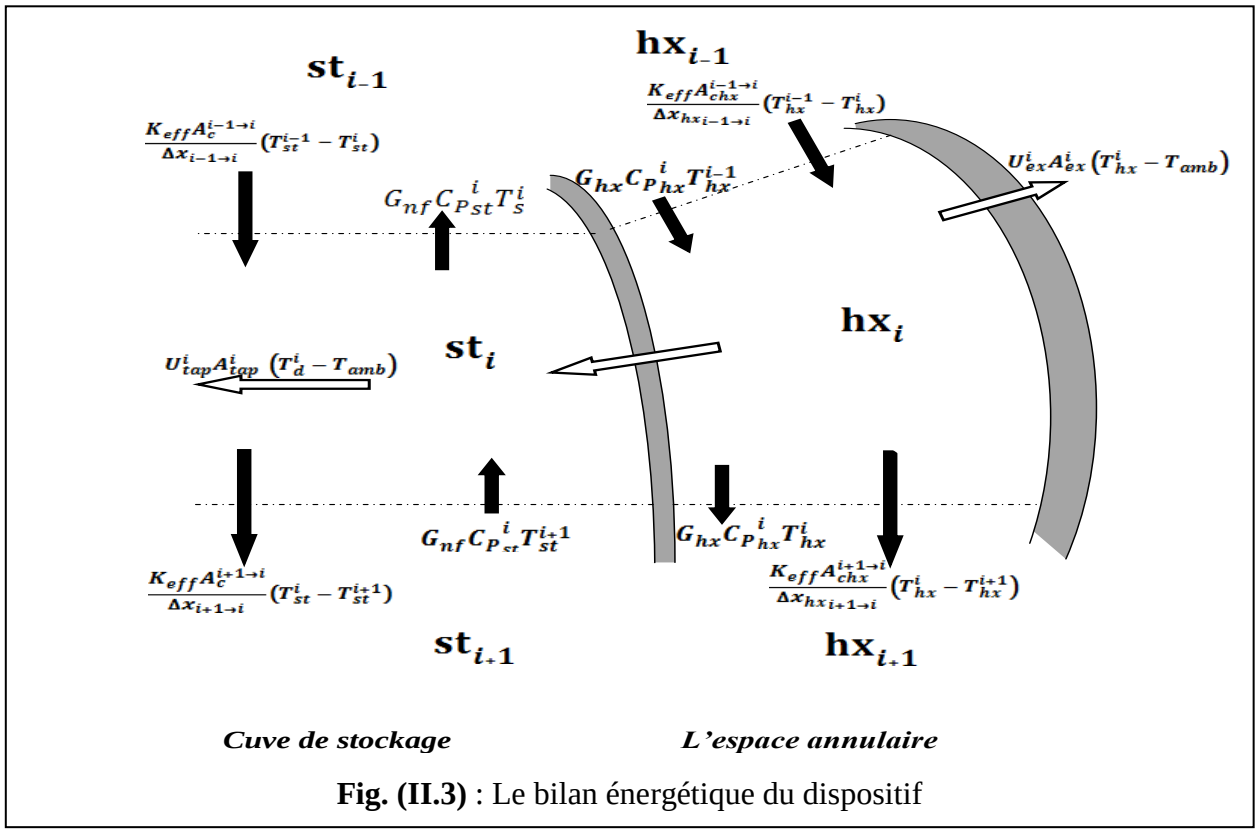


Fig. (II.3) : Le bilan énergétique du dispositif

Les équations du bilan énergétique au niveau de la cuve de stockage ainsi qu'au niveau de la double enveloppe s'écrivent comme suit:

a) Pour la cuve de stockage

$$\mathrm{m}_{st}^{i}\,cp_{st}\,\frac{dT_{st}^{i}}{dt}=U_{\mathrm{in}}^{i}\,A_{\mathrm{in}}^{i}\left(T_{\mathrm{hx}}^{i}-T_{\mathrm{st}}^{i}\right)+U_{\mathrm{tap}}^{i}\,A_{\mathrm{tap}}^{i}\left(T_{\mathrm{a}}-T_{\mathrm{st}}^{i}\right)$$

$$+\beta_{\mathrm{i}}\,\frac{K_{\mathrm{eff}\,st}\,A_{\mathrm{cst}}^{\mathrm{i+1\to i}}}{\Delta \mathrm{x}_{\mathrm{st\,i+1\to i}}}\left(T_{\mathrm{st}}^{\mathrm{i+1}}-T_{\mathrm{st}}^{\mathrm{i}}\right)+\alpha_{\mathrm{i}}\,\frac{K_{\mathrm{eff}\,st}\,A_{\mathrm{cst}}^{\mathrm{i-1\to i}}}{\Delta \mathrm{x}_{\mathrm{st\,i-1\to i}}}\left(T_{\mathrm{st}}^{\mathrm{i-1}}-T_{\mathrm{st}}^{\mathrm{i}}\right)$$

$$+\beta_{\mathrm{i}} G_{\mathrm{nf}} cp_{\mathrm{st}} \left(T_{\mathrm{st}}^{\mathrm{i}+1} - T_{\mathrm{st}}^{\mathrm{i}}\right) + (1-\beta_{\mathrm{i}}) G_{\mathrm{nf}} cp_{\mathrm{st}} \left(T_{\mathrm{ent}} - T_{\mathrm{st}}^{i}\right) \qquad \textbf{(2-25)}$$

Où $\boldsymbol{T_{\mathbf{sort}}^{\mathbf{i}}}$ est la température de sortie à **i=1**.

b) Pour l'espace annulaire

$$\mathrm{m}_{\mathrm{hx}}^{\mathrm{i}} cp_{\mathrm{hx}} \frac{dT_{\mathrm{hx}}^{\mathrm{i}}}{dt} = U_{\mathrm{in}}^{\mathrm{i}} A_{\mathrm{in}}^{\mathrm{i}} \left(T_{\mathrm{st}}^{\mathrm{i}} - T_{\mathrm{hx}}^{\mathrm{i}}\right) + U_{\mathrm{ex}}^{\mathrm{i}} A_{\mathrm{ex}}^{\mathrm{i}} \left(T_{\mathrm{a}} - T_{\mathrm{hx}}^{i}\right)$$
$$+\alpha_{\mathrm{i}} G_{\mathrm{hx}}\, cp_{\mathrm{hx}} \left(T_{\mathrm{hx}}^{\mathrm{i}-1} - T_{\mathrm{hx}}^{\mathrm{i}}\right) + (1-\alpha_{\mathrm{i}}) G_{\mathrm{hx}}\, cp_{\mathrm{hx}} \left(T_{\mathrm{froid}} - T_{\mathrm{hx}}^{\mathrm{i}}\right)$$

$$+\beta_{\mathrm{i}} \frac{K_{\mathrm{eff}} A_{\mathrm{chx}}^{\mathrm{i}+1\to\mathrm{i}}}{\Delta \mathrm{x}_{\mathrm{hx}\ \mathrm{i}+1\to\mathrm{i}}} \left(T_{\mathrm{hx}}^{\mathrm{i}+1} - T_{\mathrm{hx}}^{\mathrm{i}}\right) + \alpha_{\mathrm{i}} \frac{K_{\mathrm{eff}} A_{\mathrm{chx}}^{\mathrm{i}-1\to\mathrm{i}}}{\Delta \mathrm{x}_{\mathrm{hx}\ \mathrm{i}-1\to\mathrm{i}}} \left(T_{\mathrm{hx}}^{\mathrm{i}-1} - T_{\mathrm{hx}}^{\mathrm{i}}\right) \qquad \textbf{(2-26)}$$

Et les bilans énergétiques sont résolus par une méthode **implicite**.

II-6) les corrélations du transfert de chaleur

Le nombre de **NUSSELT** pour un transfert de chaleur dans un échangeur de chaleur s'écrit sous la forme :

$$\mathrm{N_u} = 4{,}86 + \frac{0.16\left|\mathrm{Re_w\, Pr}\frac{\mathrm{W}}{\mathrm{L}}\right|^{1.2}}{1+0.24\left|\mathrm{Re_w\, Pr}\frac{\mathrm{W}}{\mathrm{L}}\right|^{0.7} \mathrm{Pr}^{0.17}} \qquad \textbf{(2-27)}$$

Où le nombre de **NUSSELT** est basé sur la différence de température qui est égale à $\frac{\bar{\mathbf{h}}\mathbf{w}}{\mathbf{k}}$ et $\mathbf{Q = hHL\Delta T_{LM}}$

Avec **h** coefficient du transfert de chaleur par convection.

$\mathbf{Re_w}$ est le nombre de **REYNOLDS** pour l'écoulement du fluide au niveau de l'enveloppe qui est égal à $\frac{\dot{\mathrm{m}}\mathrm{w}}{\mathrm{Hw}\ \mu}$

Le nombre de **PRANDTL** est $\mathrm{Pr} = \frac{\mu \mathrm{c_p}}{\mathrm{k}}$

$$\Delta T_{LM} = \frac{|T_0 - T_p| - |T_{f,ent} - T_p|}{\ln \frac{|T_0 - T_p|}{|T_{f,ent} - T_p|}} \quad \textbf{(2-28)}$$

Où

$\mathbf{T_p}$ Température de paroi où se passe le transfert de chaleur.

$\mathbf{T_{f,ent}}$ Température d'entrée du fluide.

$\mathbf{T_0}$ Température de sortie de la double enveloppe.

$\dot{\mathbf{m}}$ Débit d'écoulement dans la double enveloppe.

W Distance entre la cuve interne et la double enveloppe.

h Longueur l'espace annulaire.

K Conductivité thermique du fluide.

μ Viscosité du fluide.

$\mathbf{c_p}$ La chaleur spécifique du fluide.

II-7) Conclusion

Pour clôturer ce chapitre, on observe que beaucoup d'équations ont été modélisé pour mieux comprendre le phénomène étudie, cette compréhension nous conduit à la fin à avoir des résultats plus profonds pour diminuer le gaspillage des énergies existantes.

CHAPITRE III

Propriétés physiques des matériaux

III.1) Introduction

La conductivité thermique est une grandeur physique qui caractérise l'aptitude d'un corps à conduire la chaleur. Elle est symbolisée par la lettre grecque λ (lambda).la conduction thermique est le mode de transfert de chaleur associée à cette grandeur.

Plus la conductivité thermique d'un matériau est élevée, plus celui-ci conduit la chaleur, et donc moins il set isolant. Dans le système international d'unités, la conductivité thermique est exprimée en watts par mètre par kelvin ($w .m^{-1}.k^{-1}$).la conductivité thermique dépend principalement de la nature du matériau et de la température mais d'autres paramètres tels que l'humidité et la pression interviennent également.

Notre étude s'intéresse à quelques métaux telque l'aluminium, le cuivre, le fer et l'acier.

III.2) L'ALUMINIUM (Al)

III.2.1) Historique

En 1807, Humphry Davy, après avoir découvert que le sodium et le potassium entraient dans la composition de l'alun (substance astringente servant à fixer les teintures), suppose qu'il s'y trouve aussi un autre métal, qu'il baptise « aluminium » (en latin, « alun » se dit alumen). Pierre Berthier découvre dans une mine près des Baux-de-Provence en 1821 un minerai contenant de 50 à 60 % d'oxyde d'aluminium. Ce minerai sera appelé bauxite.

En 1825, le chimiste et physicien danois Hans Christian Œrsted réussit à produire une forme impure du métal. Friedrich Wöhler approfondit les travaux d'Œrsted en 1827. Il isole l'aluminium par action du potassium sur le chlorure d'aluminium, obtenant une poussière grise d'aluminium. Il est le premier à mettre en évidence les propriétés chimiques et physiques de cet élément, dont la plus notable est la légèreté.**[24]**

III.2.2.1) Propriétés physiques

L'aluminium est un métal mou, léger, mais résistant avec un aspect argent-gris mat, dû à une mince couche d'oxydation de cinq à dix nanomètres qui se forme rapidement quand on l'expose à l'air et qui empêche la corrosion de progresser dans des conditions normales d'exposition chimiques. Ce film composé d'alumine se forme spontanément très rapidement quand l'aluminium est mis en contact avec un milieu oxydant comme l'oxygène de l'air. À la différence de la plupart des métaux, il est utilisable même s'il est oxydé en surface. On peut même dire que sans cette couche d'oxyde, il serait impropre à la plupart de ses applications. Il est possible d'augmenter artificiellement l'épaisseur de cette couche d'oxydation par anodisation, ce qui permet d'augmenter la protection et de décorer les pièces en colorant la couche d'oxyde. Contrairement à l'aluminium qui est un très bon conducteur, l'oxyde d'aluminium est un excellent isolant.

L'aluminium a une densité (2,7) environ trois fois plus faible que celle de l'acier ou du cuivre ; il est malléable, ductile et facilement usiné et moulé. C'est le deuxième métal le plus malléable et le

sixième le plus ductile .Il est paramagnétique et ne provoque pas d'étincelles. Bombardé par un laser à électrons libres, l'aluminium devient transparent dans les ultraviolets extrêmes.

III.2.2.2) Propriétés chimiques

En solution, l'aluminium se trouve le plus généralement sous la forme d'ions Al^{3+}. Il s'oxyde lentement à froid et rapidement à chaud pour former l'alumine Al_2O_3. L'action des acides sur l'aluminium produit l'ion cité plus haut.

La réaction de l'aluminium avec une solution aqueuse d'hydroxyde de sodium (soude) produit de l'aluminate de sodium et du dihydrogène gazeux, selon une réaction exothermique d'équation :

Les hydroxydes d'aluminium s'obtiennent en général en précipitant une solution contenant des cations Al^{3+} à l'aide d'une base. Cette méthode permet de former selon les conditions de précipitation différentes phases cristallographiques telles que la bayérite, la boehmite, la gibbsite**.[25]**

L'aluminium est aussi utilisé en tant que réducteur fort, notamment pour l'aluminothermie et en pyrotechnie dans les feux d'artifice, où il joue un rôle similaire au magnésium, à moindre coût et avec une puissance plus grande.

III.2.2.3) Propriétés biologiques, cinétique dans l'organisme humain et élimination

L'organisme d'un sujet sain contient au total de 30 à 50 mg (ATSDR 1999), surtout présent dans l'os (environ 50 %), le poumon (environ 25 %) et le foie (20 à 25 %). Le reste est partagé dans d'autres organes, dont le système nerveux central et la rate. Les taux tissulaires et notamment dans le poumon et le cerveau augmentent avec l'âge (ATSDR 1999).

Le traçage isotopique (isotope radioactif Al) d'aluminium injecté montre que 24 heures après l'injection, 99 % de l'aluminium sanguin est passé dans la fraction plasmatique. Peu à peu, le taux intra-érythrocytaire augmente pour atteindre 14 %. L'aluminium se lie, dans le plasma, préférentiellement à la transferrine (80 %), et à l'albumine à hauteur de 10 %, les 10 % restants sont transportés par des protéines de bas poids moléculaire (LMW). L'Al-transferrine se dépose surtout dans la rate et le foie (riches en récepteurs-transferrine), pendant que l'Al-LMW se fixe dans l'os (qui ne contient pas de récepteurs-transferrine).

L'homme élimine plus de 95 % de l'aluminium ingéré dans les fèces, et 83 % de l'aluminium qui aura passé la barrière intestinale sera éliminé par voie urinaire (avec une fonction rénale normale, la dose éliminée varie de 3 à 20 $\mu g \cdot l^{-1}$ d'urine**[26]**. Des chélateurs (EDTA, déféroxamine, etc.) en accélèrent l'élimination). La demi-vie dans l'organisme varie selon l'importance et la durée d'exposition et la durée de la redistribution de l'aluminium à partir des organes qui l'ont stocké. Elle peut durer plusieurs années. Elle est triphasique : en phase 1, la moitié de l'aluminium est éliminé en quelques heures, en phase deux, 50 % de ce qui reste est éliminé en quelques semaines, et il faut habituellement plus d'un an pour éliminer la moitié du reste

III.3) FER (Fe)

Le fer est l'élément chimique de numéro atomique 26, de symbole Fe.

Le corps simple est le métal et le matériau ferromagnétique le plus courant dans la vie quotidienne, le plus souvent sous forme d'alliages divers. Le fer pur est un métal de transition ductile, mais l'adjonction de très faibles quantités d'éléments d'additions modifie considérablement ses propriétés mécaniques. Allié au carbone et avec d'autres éléments d'additions il forme les aciers, dont la sensibilité aux traitements thermomécaniques permet de diversifier encore plus les propriétés du matériau.

III.3.1) Histoire de la métallurgie du fer

Le fer était connu dès le chalcolithique à travers les sites de fer telluriques et surtout les météorites de fer au fer souvent déjà allié de grande qualité, et il n'est pas assuré que sa métallurgie soit demeuré confidentielle comme on l'estime souvent jusqu'au XII^{e} siècle av. J.-C., époque qui marque, précisément, le début de « l'Âge du fer » : les Hittites, en Anatolie, avaient développé une assez bonne maîtrise du travail du fer autour du XV^{e} siècle av. J.-C., dont leur tradition attribuait l'origine dans la région du Caucase, et cette technique semble également avoir été connue assez tôt en Inde du nord, notamment dans l 'Uttar Pradesh.

Dans le monde hellénistique le fer est l'attribut d'Héphaïstos, dieu grec de la métallurgie et des volcans[12]. Chez les Romains, toujours forgé par Vulcain, avatar italique de Héphaïstos, il est un attribut princier de Mars. Les alchimistes donnèrent au fer le nom de Mars, dieu de la guerre dans la mythologie romaine.**[27]**

III.3.2) Physico-chimie nucléaire, isotopes, fréquence

Le fer 56 est le nucléide stable le plus lourd issu de la fusion du silicium par réactions α lors de la nucléosynthèse stellaire, qui aboutit en fait au nickel 56, lequel est instable et donne du ^{56}Fe par deux désintégrations β^{+} successives ; les éléments de numéro atomique plus élevé sont synthétisés par des réactions plus énergétiques intervenant plutôt lors de l'explosion de supernovas.

III.3.2.1) Propriétés nucléaires

Le noyau de fer 56 possède la masse par nucléon la plus faible de tous les nucléides mais pas l'énergie de liaison la plus élevée, en raison d'une proportion de protons un peu plus élevée que le nickel 62 qui, lui, a l'énergie de liaison la plus élevée par nucléon[9].

Le fer 56 résulte de la désintégration naturelle du nickel 56, isotope instable produit au cœur d'étoiles massives par fusion du silicium 28 au cours de réactions alpha en cascade qui s'arrêtent au nickel précisément parce que ce dernier possède l'énergie de liaison nucléaire par nucléon la plus élevée : poursuivre la fusion, pour produire par exemple du zinc 60, consommerait de l'énergie au lieu d'en libérer. **[28]**

Le tableau suivant représente les propriétés physiques

Propriétés atomiques				
Masse atomique	55,845 ± 0,002 u		**Électrons par niveau d'énergie**	2, 8, 14, 2
Rayon atomique (calc)	140 pm (156 pm)		**État(s) d'oxydation**	+2, **+3**, +4, +6
Rayon de covalence	132 ± 3 pm (low spin) 152 ± 6 pm (high spin)		**Oxyde**	Amphotère
Configuration électronique	[Ar] $4s^2$ $3d^6$		**Structure cristalline**	Cubique centré

Tableau 3.1: Propriétés atomiques de fer

III.3.2.2) Propriétés physiques

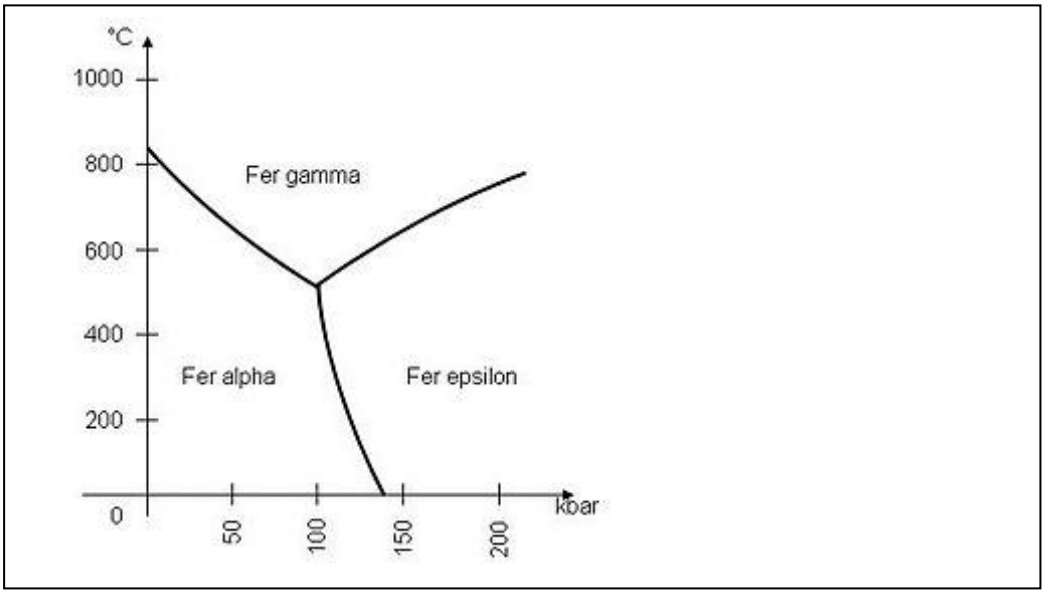


Fig.3.1 : Phases solides du fer en fonction de la pression et de la température

C'est un métal qui, en fonction de la température, présente un évident polymorphisme métallique. L'allotropie distingue :

- Dans les conditions normales de température et de pression, c'est-à-dire aux basses températures ou « à basse température », un solide cristallin de structure cubique centré (fer α, structure appelée ferrite dans l'acier). Le fer α d'un (**Fig.3.1**) est fortement ferromagnétique : les moments magnétiques des atomes s'alignent sous l'influence d'un champ magnétique extérieur et conservent leur nouvelle orientation après la disparition de ce champ. Sa température de Curie est de 770 °C. Sa capacité calorifique est de 0,5 $kJ \cdot kg^{-1} \cdot °C^{-1}$. À température ambiante, il a une dureté entre 4 et 5 sur l'échelle de Mohs. Sa masse volumique avoisine 7,86 $g \cdot cm^{-3}$ à 20 °C. Le fer alpha est caractérisé par une chaleur de sublimation atomique équivalent à 99,6 kcal/atome-gramme à température ambiante (298 K) ;
- Le fer β bêta est une structure cubique face centrée obtenue au-dessus du point de Curie, vers 770 °C ou 1 042 K. Le ferromagnétisme du fer α disparaît sans réarrangement atomique ;

- Dès les hautes températures à pression ambiante, à partir de 912 °C, le fer α devient un fer cubique à faces centrées (fer γ, structure appelée ou austénite dans l'acier) , la transformation implique une variation d'énergie interne d'environ 0,22 kcal/atome-gramme à 1 184 K. Le fer γ est paramagnétique ;
- Au-delà de 1 394 °C ou 1 665 K, il redevient un minéral de maille cubique centré (fer δ) ; cette transformation implique une variation d'énergie interne d'environ 0,27 kcal/atome-gramme ;
- La transformation en fer ε (structure hexagonale compacte) se produit à température ambiante à 130 kilobars **[28]**.

Le corps pur fond à 1 538 °C avec une chaleur latente de fusion qui est de l'ordre de 3,7 kcal/atome-gramme. L'ébullition du fer, caractérisée par une chaleur latente d'ébullition de l'ordre de 84,18 kcal/atome-gramme apparaît vers 2 860 °C, en pratique pour un corps simple plus ou moins impur entre 2 750 °C et 3 000 °C.

Le tableau suivant représente les propriétés physiques

Propriétés physiques				
État ordinaire	Solide ferromagnétique		**Énergie de vaporisation**	349,6 $kJ \cdot mol^{-1}$
Point de fusion	1 538 °C		**Volume molaire**	$7{,}09 \times 10^{-6}$ $m^3 \cdot mol$
Point d'ébullition	2 861 °C		**Pression de vapeur**	7,05 Pa
Énergie de fusion	13,8 $kJ \cdot mol^{-1}$		**Vitesse du son**	4 910 $m \cdot s^{-1}$ à 20 °C

Tableau 3.2: Propriétés physiques de fer

III.3.2.3) Propriétés chimiques

Le fer est insoluble dans l'eau et les bases. Il est soluble dans les acides.

III.3.2.3.1) Oxydation du métal

Le fer, combiné à l'oxygène, s'oxyde, suivant les conditions en trois oxydes de fer :

- l'oxyde de fer(II) FeO (« oxyde ferreux ») ;
- l'oxyde de fer(III) Fe_2O_3 (« oxyde ferrique ») ;
- l'oxyde de fer(II,III) Fe_3O_4 (« oxyde magnétique »).

À l'air libre en présence d'humidité, il se corrode en formant de la rouille, constituée d'oxydes et d'oxyhyd roxydes ferriques hydratés, qu'on peut écrire $Fe_2O_3 \cdot nH_2O$ et $FeO(OH) \cdot nH_2O$ respectivement. La rouille étant un matériau poreux, la réaction d'oxydation peut se propager jusqu'au cœur du métal, contrairement, par exemple, à l'aluminium, qui forme une couche fine d'oxyde imperméable.

La spectroscopie Mössbauer fournit un outil puissant pour la distinction des différents degrés d'oxydation du fer. Avec cette technique, il est possible de faire une analyse quantitative en présence de mélange de phases de fer.**[28]**

III.3.2.3.2) Les ions du fer en solution aqueuse

En solution aqueuse, l'élément chimique fer est présent sous forme ionique avec deux valences principales :

- Fe^{2+} (l'ion fer(II), anciennement appelé *ferreux*). Suivant l'environnement chimique en solution, il peut prendre différentes couleurs. La solution obtenue par dissolution de sel de Mohr, par exemple, présente une couleur vert pale. Une telle solution est stable pour les pH inférieurs à 6. Pour un pH supérieur à cette valeur, l'hydroxyde de fer(II) $Fe(OH)_2$ précipite ;
- Fe^{3+} (l'ion fer(III), anciennement appelé *ferrique*). Les solutions de chlorure de fer(III) sont orange, et celle de nitrate de fer(III) sont incolores. Ces solutions doivent avoir un pH inférieur à 2 car l'hydroxyde de fer(III) $Fe(OH)_3$ est peu soluble.

III.3.2.3.3) Précipitation

Un certain nombre d'ions conduisent à la précipitation des ions du fer en solution. L'ion hydroxyde HO^- est de ceux-là (voir ci-dessus). L'ion sulfure S^{2-} permet de former le sulfure de fer(II) FeS, le sulfure de fer(III) et Fe_2S_3 pour des pH pas trop acides. Il faut en effet qu'une quantité raisonnable d'ions sulfure soit présents, ce qui n'est pas le cas à pH acide puisque l'ion sulfure est alors sous sa forme diacide, le sulfure d'hydrogène H_2S.

III.3.2.3.4) Oxydoréduction des ions du fer

Les potentiels de référence des couples du fer sont :

Fe^{2+} / Fe : E° = -0,44 V

Fe^{3+} / Fe^{2+} : E° = +0,77 V

Cela indique que le fer métallique n'est pas stable en milieu aqueux. Il s'oxyde d'autant plus vite que le pH est bas.

Cela indique également qu'en présence de dioxygène dissous ($E°(O_2 / H_2O)$ = 1,3 V), les ions fer(II) ne sont pas stables non plus.

Ces potentiels de référence changent en fonction des ions présents en solution, surtout si les constantes de stabilité des complexes correspondant en Fe(II) et Fe(III) sont notablement différentes.

L'oxydoréduction est une manière de titrer les ions fer(II), par exemple par les ions cérium(IV) (couple Ce^{4+}/Ce^{3+}) ou par les ions permanganate MnO_4^- (couple MnO_4^- / Mn^{2+} en milieu acide sulfurique).

Bien que la réduction en fer métallique des ions du fer soit possible, elle est rarement pratiquée à partir de solution aqueuse.**[28]**

III.3.2.3.5) Complexassions des ions fer

De nombreux complexes du fer en solution aqueuse se forment facilement, par simple addition du ligand (au bon pH). Parmi les complexes les plus courant se trouvent ceux impliquant les ligands :

• ion cyanure CN^-

pour Fe(II) : $Fe(CN)_6^{4-}$, ion hexacyanoferrate(II), diamagnétique, jaune ;pour Fe(III) : $Fe(CN)_6^{3-}$, ion hexacyanoferrate(III), paramagnétique, orange ;

Ces complexes permettent de préparer le bleu de Prusse ;

• ion fluorure F^-pour Fe(III) : FeF^{2+}, ion fluorofer(III) incolore

En chimie analytique, ce complexe permet de marquer la couleur des ions fer(III) ;

• 1,10-phénantroline (o-phen en abrégé) pour Fe(II) : $Fe(ophen)_3^{2+}$, rouge, ions triorphophénantrolinefer(II) ; pour Fe(III) : $Fe(ophen)_3^{3+}$, vert, ions triorphophénantrolinefer(III)

Le couple redox constitué de ces deux complexes est utilisé comme indicateur de titrage d'oxydoréduction ;

• ions thiocyanate SCN^-pour Fe(III) : $Fe(SCN)^{2+}$, rouge sang, ion thiocyanatofer(III)

Ce complexe permet de mettre en évidence de petite quantité d'ion fer(III) en solution grâce à sa couleur caractéristique.**[28]**

III.3.2.3.6) Chimie organométallique

Le premier complexe organométallique isolé comme tel, en 1951, fut un complexe du fer : le ferrocène. Il est constitué d'un ion fer (II) avec deux ions cyclopentadiényles $C_5H_5^-$. De nombreux autres complexes ont été produits depuis, soit dérivés du ferrocène, soit de nature toute différente.

III.3.2.4) Gisements

Le fer est recyclable, mais son extraction n'est pas dénuée d'impact environnemental et énergétique (Mine de Erzberg, Styrie).

La majeure partie du fer dans la croûte est combinée avec l'oxygène, formant des minerais d'oxyde de fer, tels que l'hématite (Fe_2O_3), la magnétite (Fe_3O_4) et la limonite ($Fe_2O_3 \cdot nH_2O$). L'oxyde magnétique ou *magnétite* Fe_3O_4 est connu depuis l'Antiquité grecque. Il tire son nom du mont Magnétos (le grand mont), une montagne grecque particulièrement riche en ce minéral.

Environ une météorite sur vingt comprend de la taénite, unique alliage de minéral de fer-nickel (fer 35-80 %), et de la kamacite (fer 90-95 %). Bien que rares, les météorites de fer sont une source de fer nickelé, ce fer météorique arrivé sur la surface terrestre étant à l'origine de la sidérurgie au sens étymologique ; l'autre source naturelle de fer métal légèrement nickelé sont les gisements de fer tellurique ou fer natif des minéralogistes qui sont plus rares.

La couleur rouge de la surface de Mars est due à un régolithe riche en hématite amorphe ; la *planète rouge* est en quelque sorte une « planète rouillée ».90 % des gisements de minerai de fer dans le monde sont retenus dans une couche de faible épaisseur et très riche en Fe(II), la couche de fer rubané. Aux premiers temps de la vie, à l'éon Archéen vers -2 à -4 Ga, les cyanobactéries vivent dans des océans de Fe(II). Lorsqu'elles commencent à faire de la photosynthèse, l'oxygène produit est dissous et

réagit avec Fe(II) pour former des oxydes de Fe(III) qui précipitent au fond des océans. Après consommation de Fe(II), l'oxygène se concentre dans les océans puis dans l'atmosphère, il constitue alors un poison pour la proto-vie. Ainsi, les gisements de fer rubané se trouvent systématiquement entre les couches géologiques des massifs cristallins (schistes, gneiss, etc.) et les couches calcaires dolomitiques (coraux) constituant les massifs préalpins.**[29]**

III.4) Cuivre (Cu)

III.4.1) Historique

Le cuivre est, avec l'or, le premier métal à avoir été utilisé par l'Homme dès le Ve millénaire av. J.-C. parce qu'il fait partie des rares métaux qui se trouvent naturellement en tant que minéral pur, sous une forme native. Il est très étudié en archéométallurgie. Dans les Balkans, les archéologues retrouvent communément des pinges ou fosses minières de 20 à 25 m de profondeur pour extraire le cuivre dont le creusement à partir de la surface peut être daté avant le IVe millénaire av. J.-C.. Le grain d'un collier en cuivre, mis au jour en Grèce, remonte à 4 700 av. J.-C.. Mais des objets des environs de l'ancienne Mésopotamie ou actuelle Irak datant du IXe millénaire av. J.-C. ont été aussi mis au jour.

Traditionnellement, le cuivre est associé à la planète Vénus. Les alchimistes utilisaient le symbole ♀ pour le représenter. C'est donc un métal associé à la féminité, la jeunesse et l'amour. Des miroirs anciens, symbole de narcissisme, étaient faits de cuivre. **[30]**

III.4.2) Identification

Le cuivre parmi les matériaux de transition qui possède des propriétés mécanique très intéressantes. Avec une dureté de 3 mots et une densité de 8.93, le cuivre présente un intérêt particulées dans le domaine mécanique et thermodynamique. En ce qui concerne les structure et comme la majorité des métaux de transition le cuivre se cristallise dans un système cubique F dans le plus utilisé est le plan (111).

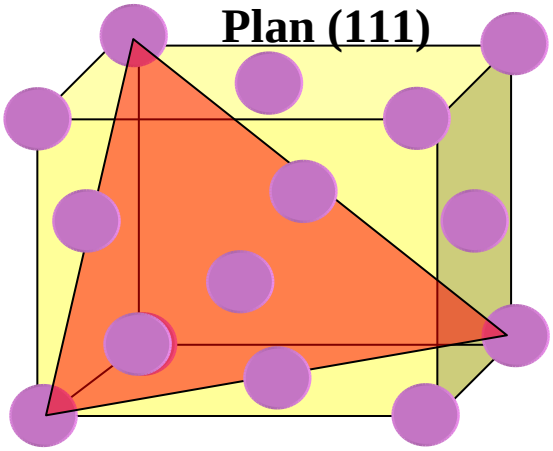


Fig3. 2 : le cuivre se cristallise dans un système cubique F

Ainsi le cuivre présente des propriétés chimique brillantes ou il est insoluble dans l'eau par contre il est soluble dans l'acide cette propriétés sous aide à l'utiliser dans les parois d'un chauffe-eau avec excellence .

Le cuivre est un élément pivot cas il est très utilisé dans les environnement anti humidité .

III.4.3) Propriétés physiques et chimiques du corps simple

Métal de couleur rougeâtre, rouge ou rouge orangée, le cuivre possède une exceptionnelle conductivité thermique et électrique. Le métal très pur est résistant à la corrosion atmosphérique et marine, mais aussi très malléable, tenace et ductile, relativement mou.**[30]**

III.4.3.1) Propriétés optiques

Opaque, métallique rouge saumon (« métal rouge ») ; Obtention d'un très beau poli ; faible après déformation ; il n'a aucune fluorescence.

Le cuivre figure parmi les métaux les plus ductiles et les plus malléables. Relativement mou, le métal peut aisément être étiré, laminé et tréfilé. Frotté, ses surfaces dégagent une odeur particulière et désagréable, effet indirect de la densité d'électrons libres au sein du réseau cristallin métallique.

Le métal peut s'altérer superficiellement après une longue exposition à l'air en une fine couche de carbonates de cuivre basique d'un beau vert ou vert-de-gris, qui forme la « patine » de certains toits recouverts de cuivre. Cette couche peut parfois comporter de la malachite et de l'azurite.**[31]**

III.4.3.2) Propriétés mécaniques et optiques

Comme l'argent et l'or, le cuivre se travaille facilement, étant ductile et malléable. La facilité avec laquelle on peut lui donner la forme de fils, ainsi que son excellente conductivité électrique le rendent très utile en électricité. On trouve usuellement le cuivre, comme la plupart des métaux à usage industriel ou commercial, sous une forme poly cristalline à grains fins. Les métaux poly cristallins présentent une meilleure solidité que ceux sous forme monocristalline, et plus les grains sont petits, et plus cette différence est importante.

La résistance à la traction est faible et l'allongement avant la rupture est important. Après le fer, le cuivre est le métal usuel le plus tenace. Les propriétés mécaniques du cuivre confirment les techniques anciennes de mise en forme de ce métal, à froid communes et à chaud plus rares. Sa malléabilité explique en partie la fabrication de vase ou forme par martelage au repoussé.

La densité pratique du cuivre fondu est de l'ordre de 8,8 à 8,9. Elle augmente sensiblement avec le laminage jusqu'à 8,95. L'écrouissage permet de rendre le cuivre à la fois dur et élastique.

Le cuivre présente une couleur rougeâtre, orangée ou brune due à une couche mince en surface (incluant les oxydes). Le cuivre pur est de couleur rose saumon. Le cuivre, l'osmium (bleu) et l'or (jaune) sont les trois seuls métaux purs présentant une couleur autre que le gris ou l'argent. La couleur caractéristique du cuivre résulte de sa structure électronique : le cuivre constitue une exception à la loi

de Madelung, n'ayant qu'un électron dans la sous-couche 4s au lieu de deux. L'énergie d'un photon de lumière bleue ou violette est suffisante pour qu'un électron de la couche d l'absorbe et effectue une transition vers la couche s qui n'est qu'a-demi occupée. Ainsi, la lumière réfléchie par le cuivre ne comporte pas certaines longueurs d'ondes bleue / violette et apparaît rouge. Ce phénomène est également présent pour l'or, qui présente une structure correspondante 5s/4d. Le cuivre liquide apparaît verdâtre, une caractéristique qu'il partage avec l'or lorsque la luminosité est faible.**[31]**

III.4.3.3) Propriétés électriques et thermiques

La similitude de leur structure électronique fait que le cuivre, l'argent et l'or sont analogues sur de nombreux points : tous les trois ont une conductivité thermique et électrique élevée, et tous trois sont malléables. Parmi les métaux purs et à température ambiante, le cuivre présente la seconde conductivité la plus élevée ($59{,}6\times10^{6}$ S/m), juste après l'argent. Cette valeur élevée s'explique par le fait que, virtuellement, tous les électrons de valence (un par atome) prennent part à la conduction. Les électrons libres en résultant donnent au cuivre une densité de charges énorme de $13{,}6\times10^{9}$ C/m^{3}. Cette forte densité de charges est responsable de la faible vitesse de glissement des courants dans un câble de cuivre (la vitesse de glissement se calcule comme étant le rapport de la densité de courant à la densité de charges). Par exemple, pour une densité de courant de 5×10^{6} A·m^{-2} (qui est normalement la densité de courant maximum présente dans les circuits domestiques et les réseaux de transport), la vitesse de glissement est juste un peu supérieure à 1/3 mm/s.

Toutefois, la résistivité du cuivre est sensible aux traces d'impuretés, elle augmente fortement avec de faibles teneurs étrangères, contrairement à celle du fer. Aussi le cuivre pur a été et est utilisé abondamment comme fil électrique, pour confectionner les câbles sous-marins et les lignes aériennes.

La conductivité électrique ou son inverse la résistivité, celle d'un fil de cuivre pur à l'état recuit témoin nommé IACS ou International Annealed Copper Standard (en), qui, mesurée à 20 °C, s'établit à $1{,}724\times10^{-8}$ Ω.m sert d'étalon de mesure en physique. La conductivité est exprimée en pourcentage IACS.

Ce métal est un très bon conducteur de la chaleur, moins toutefois que l'argent. C'est en partie pourquoi le cuivre est utilisé comme ustensile de cuisinier, réfrigérant de brasserie, dans les chaudières d'évaporation, des alambics aux sucreries. Il existait une autre raison au choix de ce métal, les capacités catalytiques du cuivre dans un grand nombre de réaction thermique.

Le cuivre fond vers 1 085 °C. Il se vaporise à une température plus élevée, son point d'ébullition étant situé vers 2 562 °C. Sa vapeur brûle avec une flamme verte intense, ce qui permet sa détection quantitative en spectrométrie de flamme ou qualitative par simple test de flamme.**[31]**

III.4.3.4) Propriétés chimiques

Le cuivre n'est pas altéré dans l'air sec, ni dans l'oxygène gazeux. Seules des traces d'eau et surtout la présence indispensable de dioxyde de carbone ou anhydride carbonique initie une réaction. Le

cuivre ne réagit pas avec l'eau, mais réagit lentement avec l'oxygène de l'air en formant une couche d'oxyde de cuivre brun-noir, de nature passivant. Contrairement à l'oxydation du fer par une atmosphère humide, cette couche d'oxyde empêche toute corrosion en masse.

En absence de dioxyde de carbone, l'oxydation du cuivre à l'air ne commence qu'à 120 °C. Il est facile de comprendre que l'action de l'eau n'est observable surtout qu'à l'état de vapeur d'eau et à haute température.

$2Cu_{\text{solide}} + ½\ O_{2\text{gaz}} \rightarrow Cu_2O_{\text{sous-oxyde solide rouge}}$.

$Cu_2O + ½\ O_{2\text{gaz}} \rightarrow CuO_{\text{solide noir}}$.

Le cuivre est au contraire altéré au contact de l'air et de l'eau acidulée, l'air accélérant l'oxydation initiée. Le vinaigre forme ainsi des oxydes de cuivre solubles. De même des traces de corps gras par leur fonction acide ou oxydante. La toxicité alimentaire des oxydes formés a justifié l'étamage (ajout d'une couche protectrice d'étain) traditionnel des instruments et récipients culinaire en cuivre. Les anciens éleveurs ou fromagers, distillateurs, cuisiniers ou confituriers veillaient à une propreté rigoureuse des surfaces de cuivre après utilisation lors d'un chauffage.

L'air humide joue un rôle toutefois limité. Une couche verte de carbonate de cuivre ou hydrox carbonate de cuivre basique $Cu_2CO_3{\cdot}Cu(OH)_2$, appelée vert-de-gris, se remarque souvent sur les constructions anciennes en cuivre ou sur les structure en bronze en milieu urbain (présence de dioxyde de carbone et d'humidité), telles que les toitures en cuivre ou la statue de la Liberté. Cette couche joue en partie le rôle de patine protectrice. Mais en milieu marin ou salin (présence de chlorures apporté par des bruines) ou en milieu industriel (présence de sulfates), ils se forment d'autres composés, respectivement l'hydrox chlorure $Cu_2Cl_2{\cdot}Cu(OH)_2$ et l'hydrox sulfate $Cu_2SO_4{\cdot}Cu(OH)_2$.

Le cuivre réagit avec le sulfure d'hydrogène — et toutes les solutions contenant des sulfures, formant divers sulfures de cuivre à sa surface. Dans des solutions contenant des sulfures, le cuivre, présentant un avilissement de potentiel par rapport à l'hydrogène, se corrodera. On peut observer ceci dans la vie de tous les jours, où les surfaces des objets en cuivre se ternissent après exposition à l'air contenant des sulfures.

La réaction-type pour obtenir les sulfures de cuivre en précipités noirs peut être utilisé pour détecter le cuivre, elle est très lente à 20 °C, plus efficace à 100 °C et surtout très rapide à 550 °C, où elle s'écrit simplement :

$2\ Cu_{\text{solide}} + H_2S_{\text{gaz}} \rightarrow Cu_2S_{\text{solide noir}} + H_{2\text{gaz}}$.

La réaction avec l'acide chlorhydrique est très lente.

$Cu_{\text{solide}} + HCl_{\text{gaz}} \rightarrow CuCl_{\text{solide noir}} + ½H_{2\text{gaz}}$.

Ainsi le cuivre n'est pas véritablement attaqué à température ambiante par l'acide chlorhydrique concentré en milieu aqueux. Il y est très peu soluble. Le cuivre se dissout par contre dans les autres acides halogénohydriques, tel que HBr ou HI.

D'une manière générale, ce sont les acides oxydants ou les autres acides en présence de gaz oxygène dissous qui peuvent attaquer le cuivre. Pourtant le cuivre n'est pas attaqué par l'acide sulfurique concentré à froid, mais uniquement par cet acide fort concentré et à chaud. Il se forme des sulfates d'oxyde de cuivre et de l'acide sulfureux en phase gazeuse.

L'acide nitrique est le dissolvant par excellence du cuivre. La réaction chimique est active même avec l'acide dilué. Elle explique les possibilités graphiques des gravures sur cuivre à l'eau forte. Voici les deux réactions de base, la première en milieu concentré, la seconde en milieu dilué.

$Cu_{\text{solide métal}} + 4\ HNO_{3\text{aqueux, concentré}} \rightarrow Cu(NO_3)_{2\text{aqueux}} + 2NO_{2\text{gaz}} + 2\ H_2O_{\text{eau}}$.

$Cu_{\text{solide métal}} + 8\ HNO_{3\text{aqueux, dilué}} \rightarrow 3\ Cu(NO_3)_{2\text{aqueux}} + 2NO_{\text{gaz}} + 4\ H_2O_{\text{eau}}$.

Le cuivre réagit en présence d'une association d'oxygène et d'acide chlorhydrique pour former toute une série de chlorures de cuivre. Le chlorure de cuivre(II) bleu/vert, lorsqu'il est porté à ébullition en présence de cuivre métallique, subit une réaction de rétro-dismutation produisant un chlorure de cuivre(I) blanc.

Le cuivre réagit avec une solution acide de peroxyde d'hydrogène qui produit le sel correspondant :

$Cu + 2\ HCl + H_2O_2 \rightarrow CuCl_2 + 2\ H_2O$.

L'ammoniaque oxyde le cuivre métal au contact de l'air. Il se forme de l'oxyde de cuivre soluble et du nitrate d'ammonium, avec excès d'ammoniac. Le cuivre se dissout lentement dans les solutions aqueuses d'ammoniaque contenant de l'oxygène, parce que l'ammoniac forme avec le cuivre des composés hydrosolubles. L'ammoniaque concentré le dissout facilement en donnant une solution bleue, dénommée traditionnellement « liqueur de Schweitzer », à base du cation complexé $Cu(NH_3)_4^{2+}$ ou mieux en milieu basique $Cu(NH_3)_4(H_20))^{2+}$. Cette liqueur est susceptible de dissoudre la cellulose et les fibres cellulosiques, comme le coton ou les charpies textiles des chiffonniers. Ainsi se fabrique la rayonne au cuivre ammoniacal.

Le cuivre surtout en poudre a des propriétés catalytiques diverses. Par exemple, c'est un catalyseur permettant la synthèse du cyclopropane.

Lorsque le cuivre est en contact avec des métaux présentant un potentiel électrochimique différent (par exemple le fer), en particulier en présence d'humidité, la fermeture d'un circuit électrique fera que la jonction se comportera comme une pile électrochimique. Dans le cas par exemple d'une canalisation en cuivre raccordée à une canalisation en fer, la réaction électrochimique entraîne la transformation du fer en d'autres composés et peut éventuellement endommager le raccord.**[31]**

III.5) Acier

III.5.1) Histoire

L'Âge du fer se caractérise par l'adaptation du bas fourneau à la réduction du fer. Ce bas fourneau produit une loupe, un mélange hétérogène de fer, d'acier et de laitier, dont les meilleurs morceaux doivent être sélectionnés, puis cinglés pour en chasser le laitier.

En poussant le vent, on attise la combustion et la température de fusion du métal est atteinte. On extrait le métal par vidange du creuset : c'est la production au haut fourneau. On obtient alors de la fonte, le fer liquide se chargeant de carbone au contact du charbon de bois. En effet, deux phénomènes complémentaires se déroulent dans le creuset du haut fourneau : le fer se charge de carbone lorsqu'il arrive au contact du charbon de bois, ce qui abaisse son point de fusion. Puis ce métal fondu continue à s'enrichir en carbone, en dissolvant le charbon de bois. Les premières coulées de fonte ont été réalisées par les Chinois durant la période des Royaumes combattants (entre -453 et -221). Ceux-ci savent aussi brûler le carbone de la fonte, en le faisant réagir avec de l'air, pour obtenir de l'acier. Il s'agit du procédé indirect, car l'élaboration de l'acier se fait après l'obtention de la fonte. En Europe et en Asie, durant l'Antiquité, on produisait également de l'acier en recarburant le fer avec des gaz de combustion et du charbon de bois (acier de cémentation).

En raison de ses propriétés, l'acier est peut-être le matériau pour l'ingénierie et la construction le plus important au monde. **[32]**

III.5.2) Propriétés et caractéristiques

Les propriétés essentielles de l'acier sont de grandes formabilité et durabilité, de bonnes contrainte de traction et limite d'élasticité, une bonne conductivité thermique, et pour les aciers inoxydables une résistance à la corrosion.

Lorsqu'ils élaborent un matériau pour une utilisation particulière, les ingénieurs doivent s'assurer qu'il conviendra parfaitement aux conditions de chargement et aux défis environnementaux auxquels il sera plus tard confronté. Comprendre et contrôler les propriétés des matériaux est donc primordial. Les propriétés mécaniques de l'acier peuvent être soigneusement contrôlées à travers une sélection judicieuse de la composition chimique, du processus de transformation et du traitement thermique, menant à sa microstructure finale.

Les alliages et le traitement thermique utilisés pour la production de l'acier engendre des propriétés de valeurs et de forces différentes. Il faut les tester pour déterminer les propriétés finales d'un acier et assurer son respect des normes recherchées.

Il existe de nombreux systèmes de mesure permettant de définir les propriétés d'un acier donné. La limite d'élasticité, la ductilité et la rigidité sont par exemple déterminées en utilisant des tests de traction. La ténacité est mesurée par essais au choc, et la dureté est déterminée en mesurant la résistance à la pénétration de la surface par un objet dur.

L'essai de traction est une méthode visant à évaluer la réponse structurelle de l'acier aux charges appliquées, les résultats étant exprimés en tant que relation entre la tension et la déformation. La relation entre la tension et la déformation est une mesure d'élasticité du matériau : ce coefficient est appelé module de Young. L'acier se différencie principalement par une valeur élevée du module de Young; ce dernier varie entre 190-210 GPa, ce qui représente environ trois fois la valeur de l'aluminium.**[32]**

Les propriétés physiques de l'acier sont liées à la physique du matériau, tels que la densité, la conductivité thermique, le module d'élasticité, le coefficient de Poisson etc. Quelques valeurs caractéristiques des propriétés physiques de l'acier sont :

- la densité $\rho = 7.7 \div 8.1$ [kg/dm3]
- le module d'élasticité E=190÷210 [GPa]
- le coefficient de Poisson $\nu = 0.27 \div 0.30$
- la conductivité thermique $\kappa = 11.2 \div 48.3$ [W/mK]
- la dilatation thermique $\alpha = 9 \div 27$ [10-6 / K]

III.5.3) Normes d'acier

Les normes d'acier sont un système de classification, d'évaluation et de spécification des propriétés chimiques, mécaniques et métallurgiques de différents types d'aciers et d'alliages ferreux utilisés dans la production de composants, la machinerie et la construction.

Les normes d'acier sont utiles pour guider les laboratoires métallurgiques, les fabricants et les utilisateurs finaux dans la production, le traitement et l'utilisation de l'acier.

Les aciers peuvent être classés d'après de nombreux critères tels que :

- La composition, par exemple l'acier au carbone, faiblement allié ou inoxydable
- Les procédés de fabrication, par exemple au four Siemens Martin, à l'oxygène pur ou au four électrique
- Les procédés de finition, comme le laminage à chaud, à froid, le traitement de surface et le placage
- La forme du produit, par exemple les barres à imprimer, les tôles, les bandes, les tubages ou les profilés de construction
- Le processus de désoxydation, comme les aciers calmés, semi-calmés, coiffés ou effervescents
- La microstructure, Ferri tiques, perl tiques et martensitiques
- Le traitement thermique appliqué, comme le recuit, la trempe et le revenu.

Malheureusement, il n'existe pas de système international de normalisation ou de classification de l'acier. Au lieu de cela, plusieurs systèmes de classification et de désignation sont acceptés et

cohabitent à travers le monde. Ces derniers sont en vigueur à échelle nationale ou internationale et ont été développés par des organismes de normalisation, ou par des industries verticales et des fournisseurs spécifiques. Parmi les systèmes de normalisation et de classification les plus utilisés, on trouve :

- L'AISI (Institut américain du fer et de l'acier), dont les normes sont traditionnellement utilisées aux USA et ailleurs. Bien qu'il ne soit plus mis à jour et ait peu à peu été remplacé par la SAE, ASTM et d'autres normes américaines, il est toujours très répandu.
- EN (Euronorme), qui est un système harmonisé de normes de métaux et d'aciers dans les pays européens. Bien qu'il soit accepté et utilisé de façon soutenue dans toute l'Europe, des systèmes nationaux "obsolètes" tels que l'Allemand DIN, le Britannique BS, le Français AFNOR et l'Italien UNI sont couramment utilisés et régulièrement trouvés dans bon nombre de documents et de spécifications.
- Les normes d'aciers japonaises JIS sont largement utilisées en Asie et dans le Pacifique. Les spécifications d'acier JIS ont souvent été la base d'autres systèmes nationaux comme les normes coréennes, chinoises et taïwanaises.
- Les normes d'aciers des nouveaux pays industrialisés, comme les Chinois GB et YB, l'Indien IS et le Brésilien NBR, bien que souvent moins développés et détaillés, sont de plus en plus utilisés en raison de l'approvisionnement international. Il en va de même pour le Russe GOST, qui est pratiquement la norme de facto pour toute la communauté des états indépendants.

Les normes d'acier de l'industrie verticale incluent la SAE pour l'automobile, l'aérospatial et autres; ASTM pour les équipements sous pression et bien d'autres utilisations; AWS pour les consommables de soudage et les matériaux relatifs. Les spécifications pour la construction navale sont assurées par l'Américain ABS, le Britannique Lloyds, l'Italien RINA et d'autres.

Outre les normes décrites ci-dessus, de nombreux fabricants et fournisseurs d'acier ont développé leurs propres noms propriétaires et commerciaux pour l'élaboration de l'acier. Après plusieurs décennies d'utilisation, certaines de ces désignations sont devenues pleinement acceptées par la communauté industrielle et font souvent office de noms "courants" ou "commerciaux", sans ne plus se référer à un fournisseur en particulier. Dans la plupart des cas, ces noms "courants" ne sont pas normalisés et les propriétés peuvent varier considérablement. Leur usage dans des documents techniques officiels doit donc être évité. **[33]**

III.6) Conclusion

On remarque une différence des caractéristiques physiques et chimiques entre les différents matériaux utilisés dans notre étude, ce qui explique que chacun d'eux discerne par ses propriétés individuelles.

Chapitre IV

Résultats et discussions

IV.1) Introduction

Les résultats présentés sont à partir des simulations numériques de l'échangeur de chaleur à double enveloppe réalisés par le programme **SOLIDWORKS**(**SOLIDWORKS2012**). Les résultats de base calculés par **CFD** comprennent la distribution de température ainsi que les structures de d'écoulement.

IV.2) Expériences thermiques

Avec une cuve à double enveloppe en acier, différentes expériences thermiques transitoires ont été effectuées dans des installations d'essai de stockage de chaleur. Les résultats ont été utilisés pour évaluer la distribution de température calculée et la température de sortie de la double enveloppe.

Une des études sur ce type d'échangeur a été réalisée expérimentalement (au département du génie civil de l'**U**niversité du Danemark par **SØREN KNUDSEN[45]** avec une cuve de stockage à double enveloppe verticale en verre), ces expériences de visualisation de l'écoulement qui illustrent la structure de l'écoulement au niveau de la double enveloppe ainsi qu'au niveau de la cuve interne de stockage ont été effectuées avec un système **PIV**.

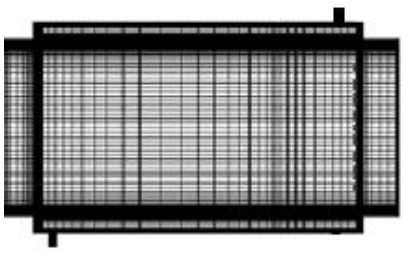
IV.3) Modélisation numérique

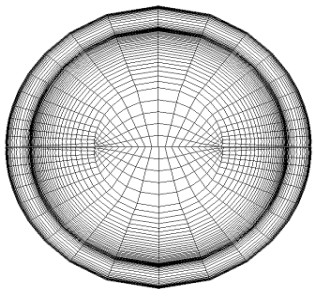
Le calcul numérique a été réalisé à l'aide du code de calcul "**SOLIDWORKS**" qui utilise la méthode des volumes finis.

Pour la résolution du problème thermique, il faut tout d'abord préciser les conditions aux limites de l'échangeur de chaleur à double enveloppe.

On a étudié quatre cas possibles pour différents matériaux de construction de la cuve interne où se passe le phénomène du transfert thermique:

La figure suivante illustre la configuration de notre dispositif à étudier :





Entrée du haut et sortie en bas

Coupe transversale **Coupes longitudinales**

Figure (IV.1):Précision des conditions aux limites

On doit prendre la cuve de stockage complètement remplie à une température égale à 26°C et la température d'entrée d'eau chaude est de 50°C.

Le modèle validé est par la suite appliqué au cas spécifique relatif à notre étude puis l'utilisé pour apporter des réponses aux questions ayant suscité ce travail de recherche.

Les caractéristiques de notre dispositif à modélisé sont résumées dans le tableau suivant :

Caractéristiques du dispositif	
La cuve de stockage	
Volume de stockage d'eau chaude, [m^3]	0.15
Distance entre les extrémités, [m]	0.972
Diamètre, [m]	0.45
Epaisseur de la paroi, [m]	0.003
Le gilet	
Volume, [m^3]	0.0319
Distance entre les extrémités, [m]	0.7
L'espace annulaire, [m]	0.08
Position de l'entrée,[m]	0.136 de l'extrémité
L'isolation	
matériel	**Laine minéral**
L'isolation maximale,[m]	0.13
L'isolation du coté du gilet, [m]	0.06
L'isolation aux bords des extrémités du gilet, [m]	0.06

Tableau (IV.1) : Les caractéristiques du dispositif

IV.4) Résultats et discussion

IV.4.1) Maillage du dispositif

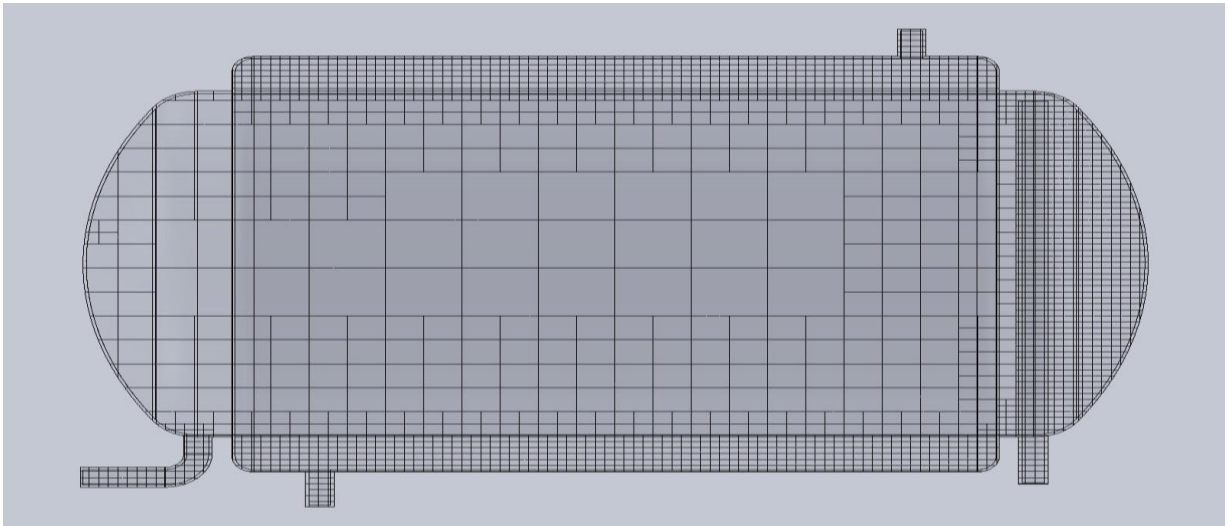


Fig.(IV.2) : Vue en 2D du maillage du dispositif

On a insérer le maillage au niveau de l'espace annulaire et à la surface latérale de la cuve de stockage car nous intéressons au phénomène du transfert thermique entre les deux fluides (le fluide caloporteur et le fluide froid).

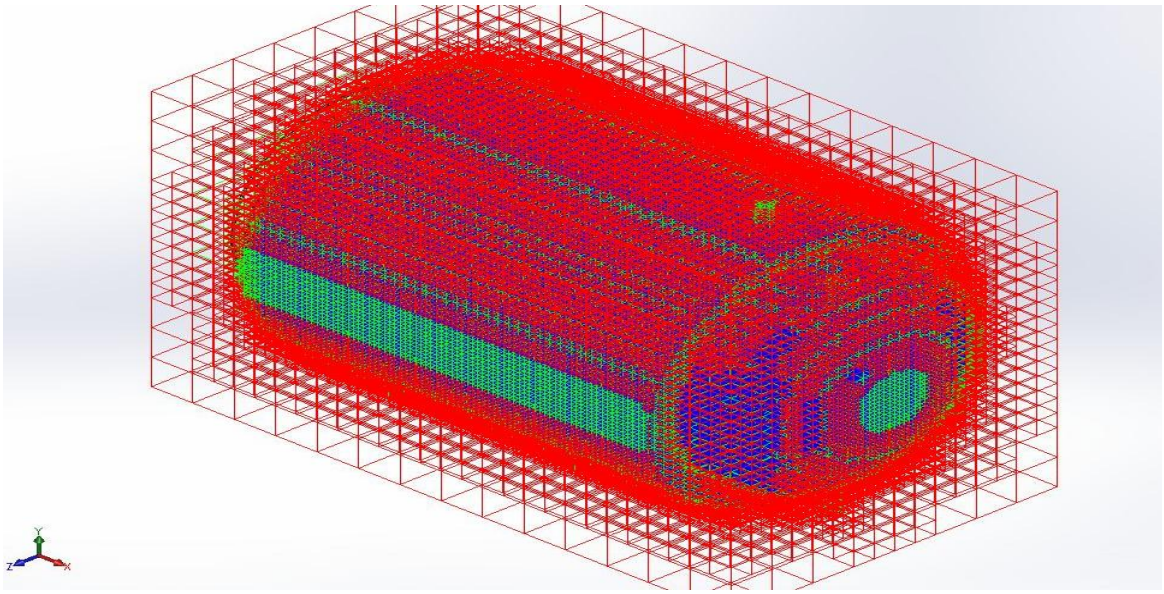


Fig.(IV. 03) : Vue en 3D du maillage du dispositif

La couleur rouge indique la direction de l'écoulement suivant l'axe X, le vert suivant Y et le bleu suivant Z.

IV.5) Conclusion

On déduit que les conditions aux limites précisées jouent une très grande importance pour reçois des résultats plus proches à la réalité.

Chapitre V

Résultats et discussions

V.1) Introduction

A partir d'une simulation des différents dispositifs, les résultats sont présentés dans ce chapitre avec des interprétations pour chaque cas étudié.

V.2) Cuve de stockage en cuivre

V.2.1) Profil de température au niveau du gilet

Dans la figure ci-dessus, On observe que la température des particules chaudes du fluide caloporteur baissent rapidement, ce qui explique qu'il y'on'a une forte absorption de chaleur par les le fluide froid de la cuve interne.

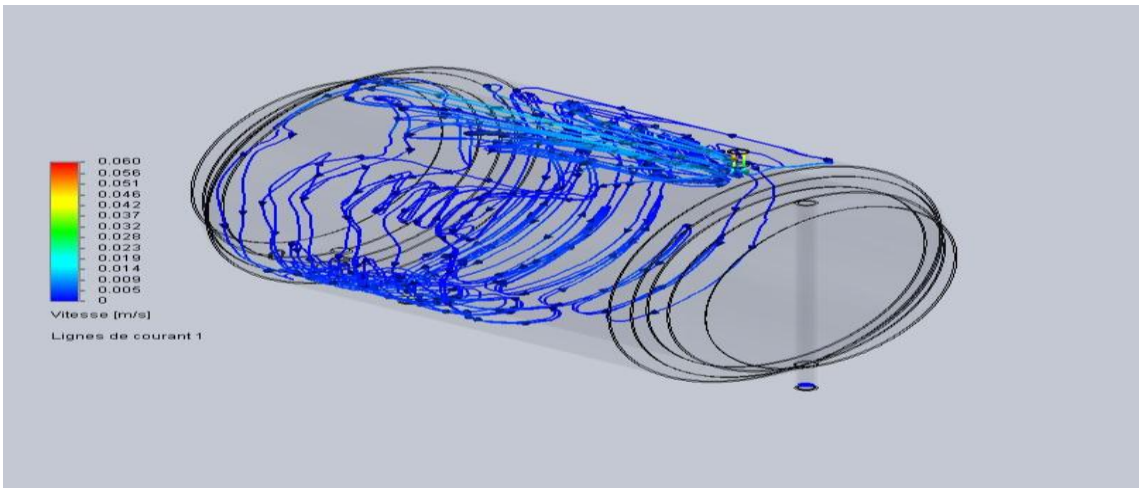


Fig.(V. 01) : Le profil de température au niveau de l'espace annulaire

La différences de couleurs observée au niveau de l'eau stockée dans la cuve interne, nous conduit à dire que la température de cette eau augmente d'une manière rapide et progressive même au niveau de l'espace annulaire, ce qui explique que la surface de cette cuve a sucé une quantité de chaleur rapidement.

V.2.2) Stratification thermique

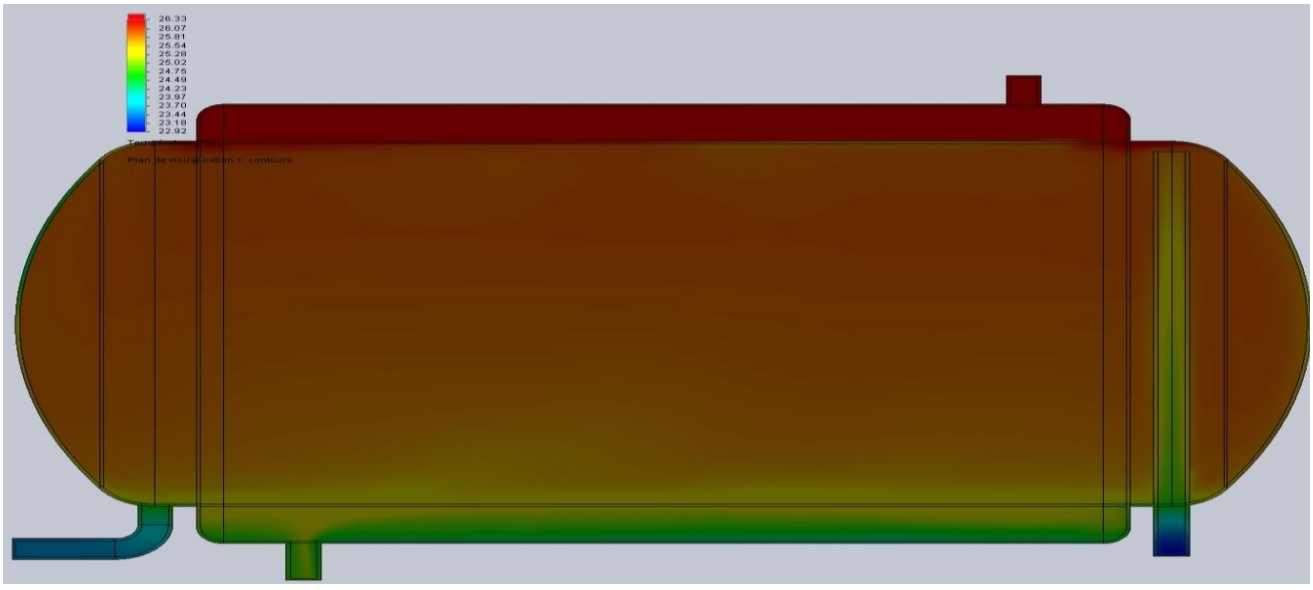


Fig.(V. 02) : La stratification thermique de la cuve de stockage en cuivre

L'évolution de la température au niveau de la cuve de stockage est représentée dans la figure V-03 ; où l'on observe une variation plus importante (une forte concentration dans la partie supérieure) de température de l'eau stockée.

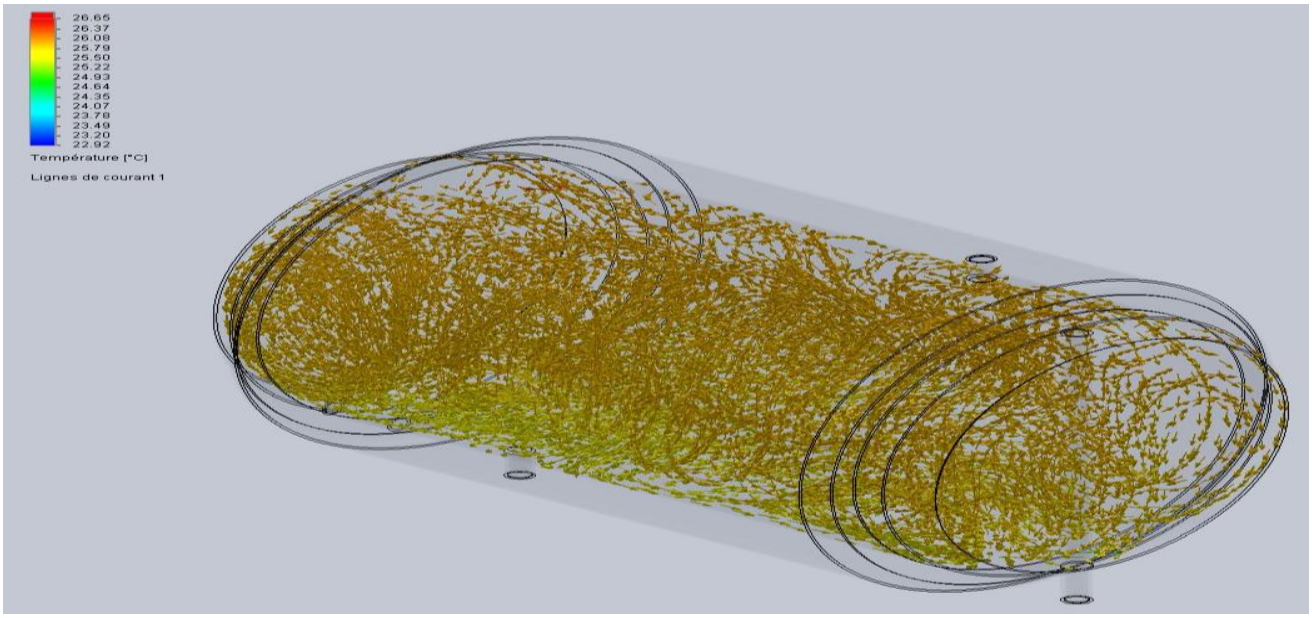


Fig.(V. 03) : Profil de température au niveau de la cuve de stockage en cuivre

On observe qu'il y'on'a une forte chute de température dans une distance très courte figure (5-04), la chose qui nous explique qu'il y'avait une absorption rapide de chaleur du fluide caloporteur.

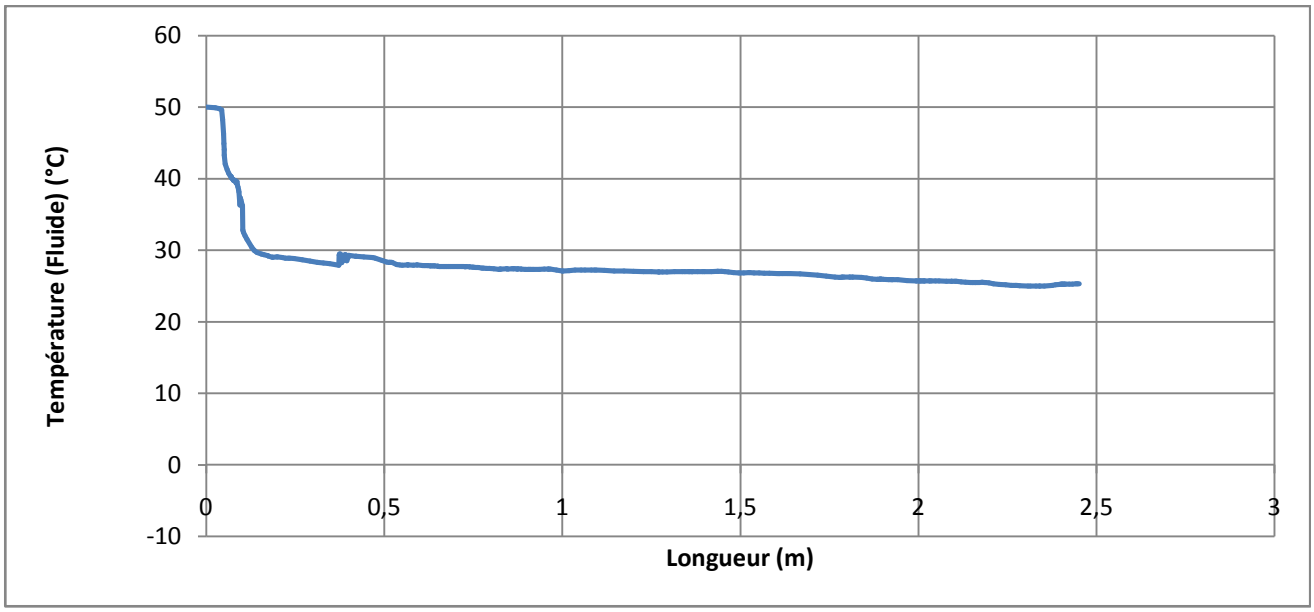


Fig. (V. 04) : Profil de température au niveau de l'espace annulaire en fonction de la longueur

V.3) Cuve de stockage en aluminium

V.3.1) Profil de température au niveau du gilet

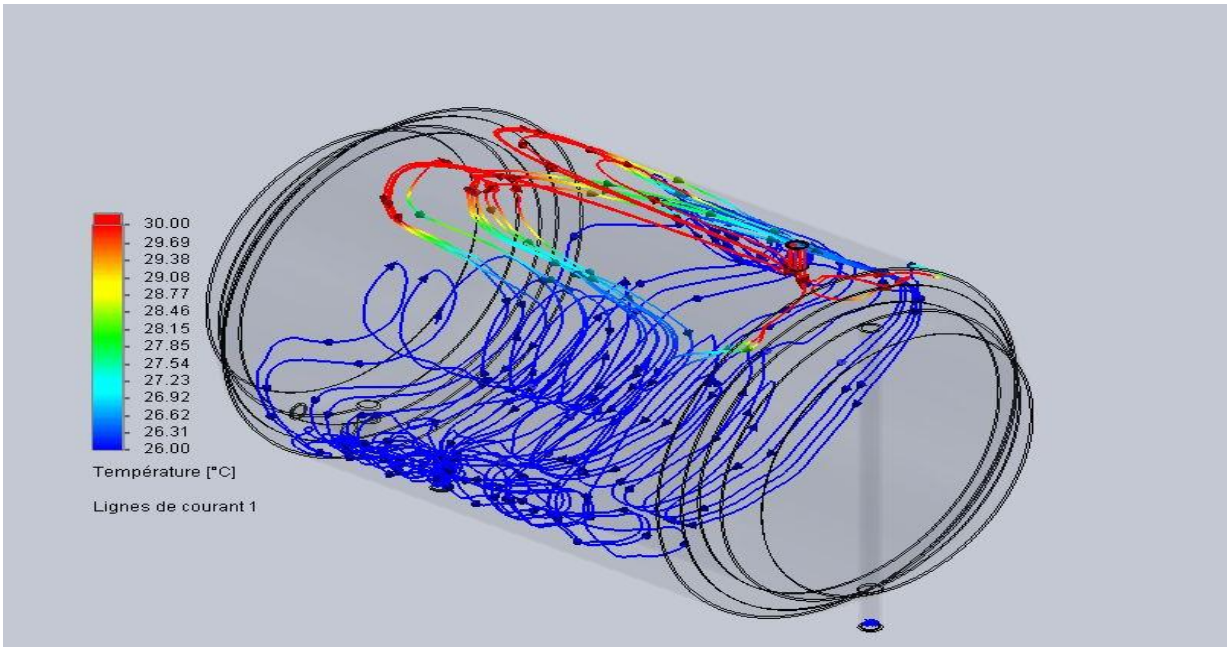


Fig.(V. 05) : Le profil de température au niveau de l'espace annulaire

On observe que la répartition de la température est concentrée dans la partie supérieure du gilet (à l'entrée) et que les particules fluides occupent une surface un peu plus large que dans le cas précédent (cuve de stockage en cuivre), ce qui nous explique que l'eau stockée récupère une telle quantité moins importante de chaleur du fluide caloporteur que celle récupéré pour le cas de cuivre; le phénomène qui est expliqué dans la figure suivante.

V.3.2) Stratification thermique

Les différentes couches représentées par des couleurs (figure V-06) signifies qu'il y'avait un transfert thermique qui se passe lentement dans la partie supérieure de la cuve de stockage en aluminium. Ce qui sera expliqué par la courbe qui représente l'évolution de température au niveau de l'espace annulaire.

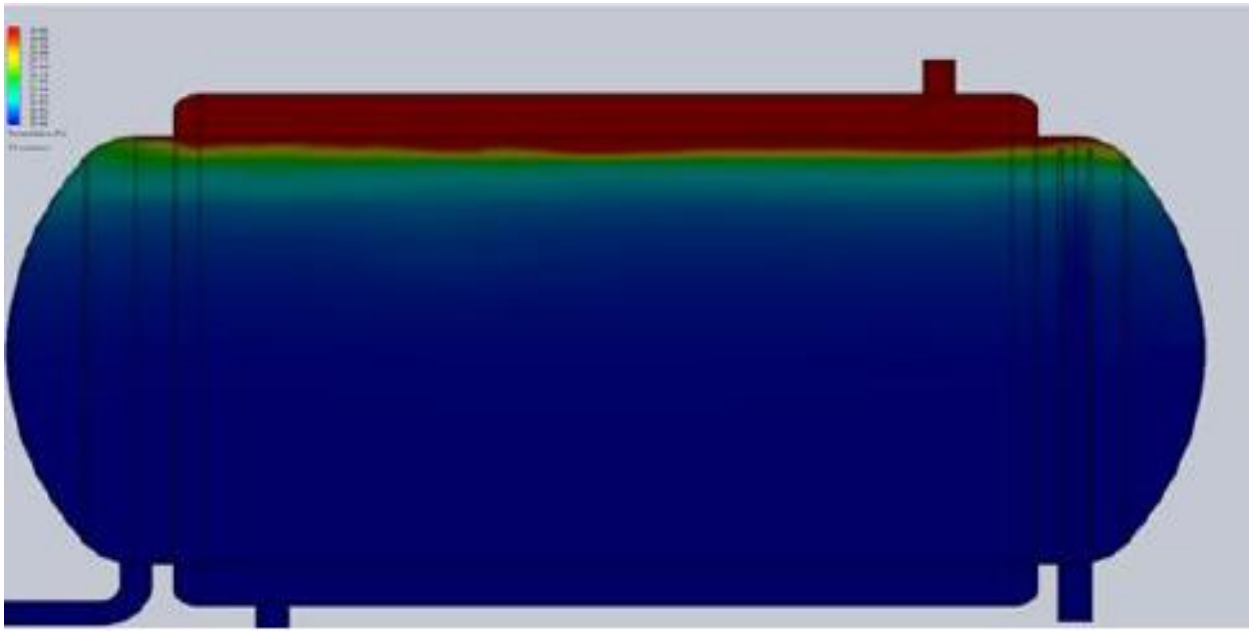


Fig.(V. 06) : La stratification thermique (cuve en aluminium)

V.3.3) Evolution de la température au niveau de l'espace annulaire

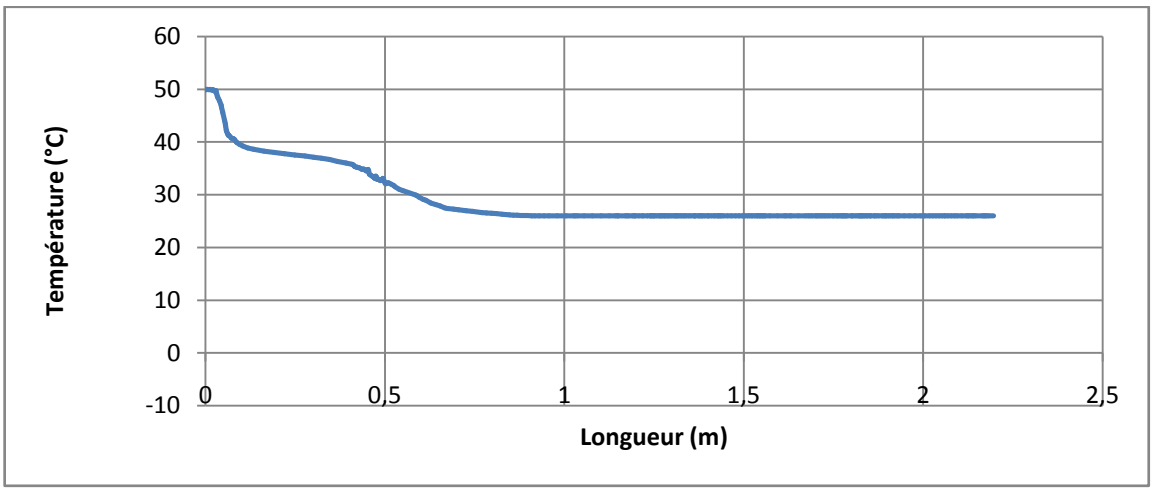


Fig.(V. 7) :L'évolution de la température au niveau de l'espace annulaire

La diminution progressive de température qu'on l'observe, par rapport à celui du premier cas, explique qu'il y'avait une absorption de chaleur graduellement du fluide caloporteur au niveau de l'espace annulaire.

V.4) Cuve de stockage en fer

V.4.1) Profil de température au niveau de l'espace annulaire

Il est a noté que les particules fluides caloporteur occupent presque la moitié de surface externe de la cuve interne, ce qui explique que l'échange thermique s'effectue d'une manière

moins rapide que pour les deux cas précédents, cette explication est configurée sur la figure qui représente la stratification thermique au niveau de la cuve de stockage.

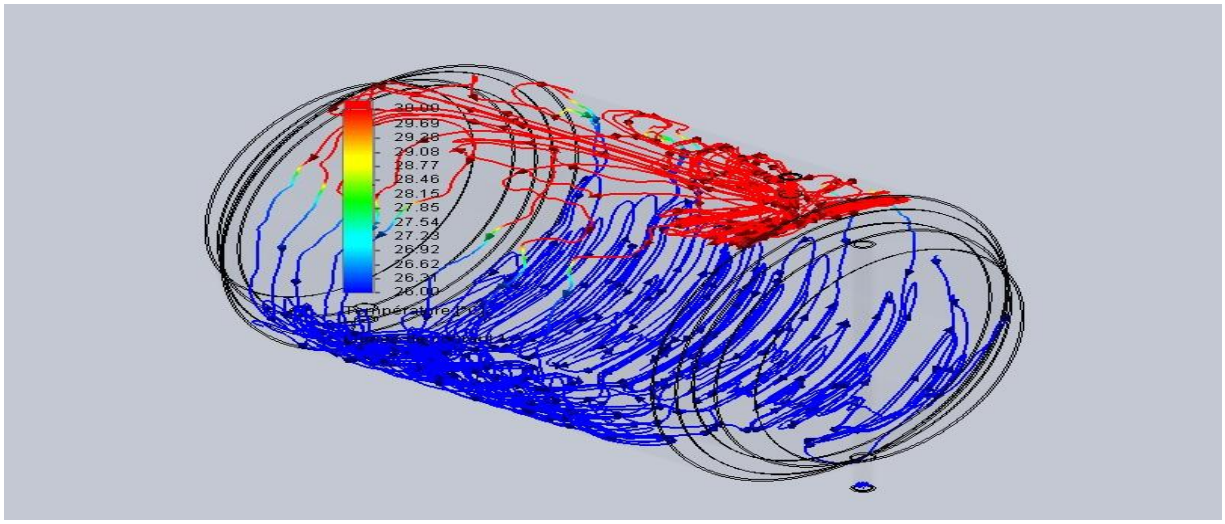


Fig.(V. 8) : Le profil de température au niveau de l'espace annulaire

V.4.2) Stratification thermique

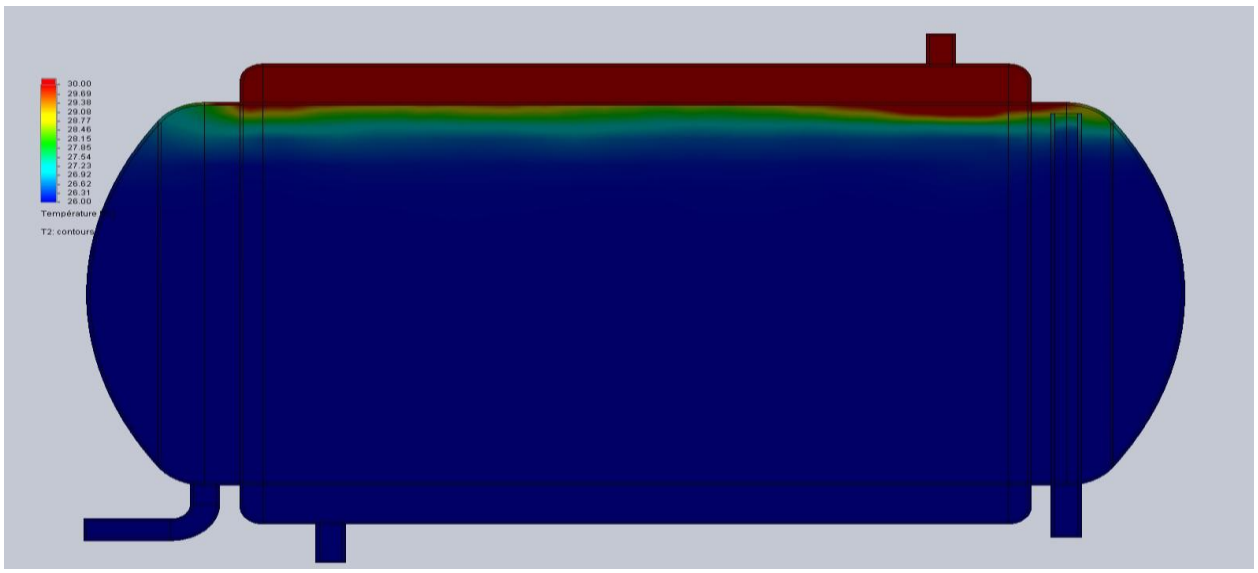


Fig.(V.9) : La stratification thermique (cuve en fer)

On observe que l'épaisseur de différentes couches de couleurs dans la cuve de stockage diminue, ce qui explique que l'absorption de chaleur a diminué par rapport au dispositif précédent.

A partir de cette remarque, on peut dire que la conductivité thermique de fer est mauvaise par rapport aux deux premiers dispositifs.

V.4.3) Evolution de la température au niveau de l'espace annulaire

On observe une détente thermique graduelle au niveau de l'eau caloporteur moins intense que pour les deux cas précédents. Ce qui nous donne des détails plus précises que le fer ne

suce pas rapidement de la chaleur.

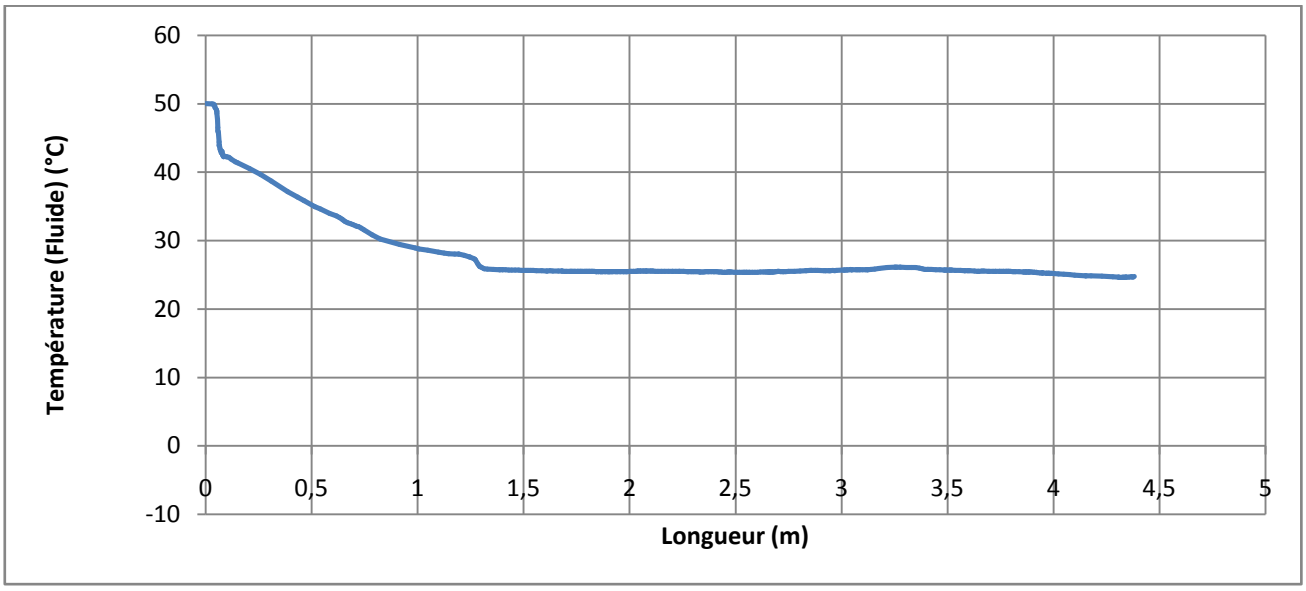


Fig.(V.10) : Evolution de la température au niveau de l'espace annulaire

V.5) Cuve de stockage en acier

V.5.1) Profil de température au niveau de l'espace annulaire

On observe sur la figure (V -11) que le fluide caloporteur entrant s'écoule directement avec une quantité très importante au niveau de l'espace annulaire (en rouge) où il occupe presque la majorité de la surface externe de la cuve de stockage, la chose qui nous conduit directement à dire qu'il y'avait un mauvais échange thermique entre cette eau et la cuve interne. On conclue que ce matériau est le plus mauvais suceur. Cette explication est apparente sur la configuration qui illustre la stratification thermique de la cuve de stockage (Fig. (V.11))

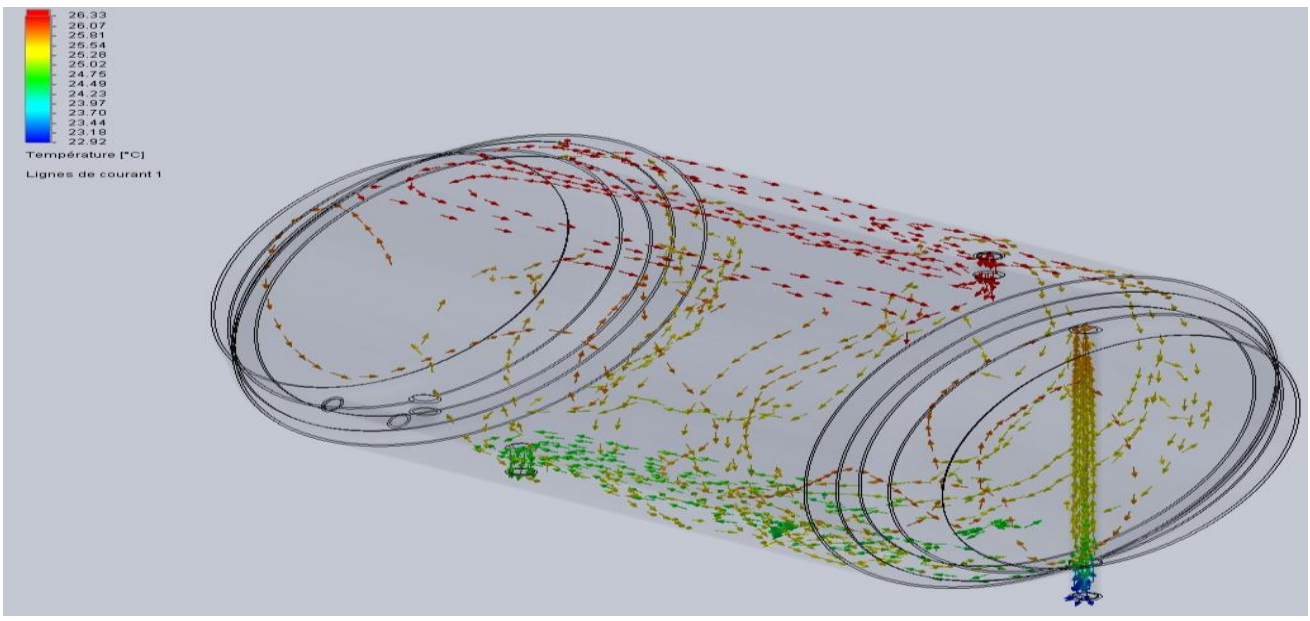


Figure (V.11) : Profil de température au niveau de l'espace annulaire

V.5.2) Stratification thermique

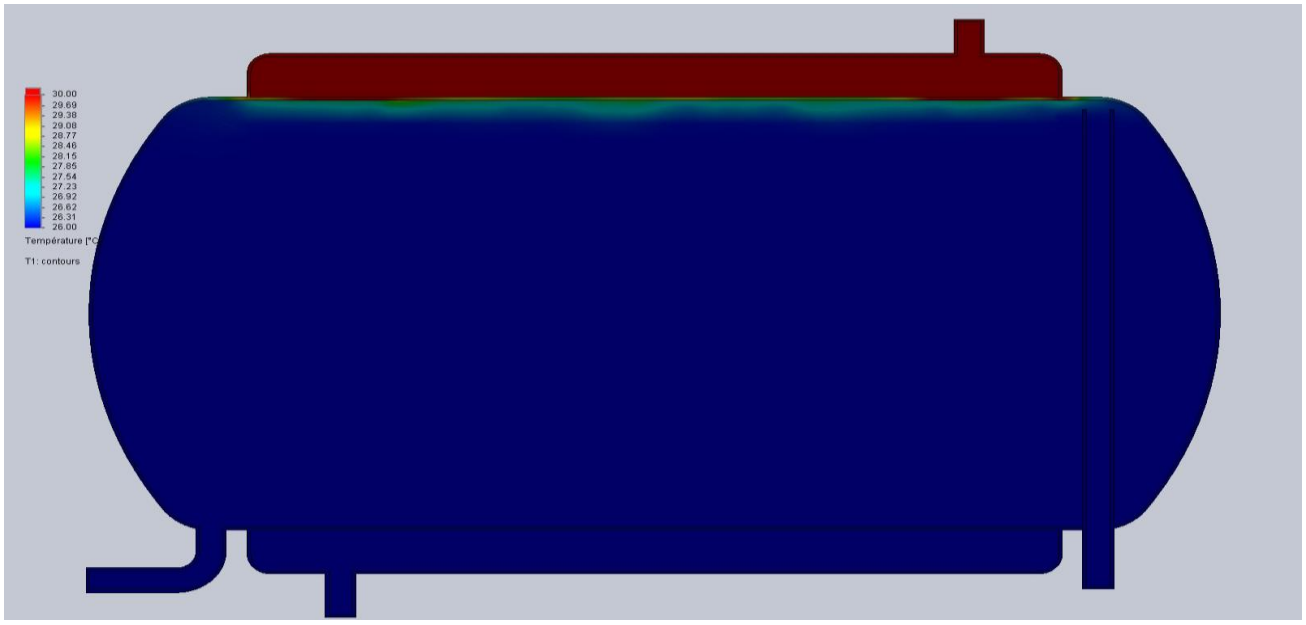


Fig.(V.12) : La stratification thermique de la cuve de stockage (cuve en fer)

La disparition des plusieurs couches de couleurs explique que le phénomène de transfert de chaleur se déroule d'une manière très lente par rapport aux cas précédemment étudiés et même pour une même dure.

V.5.3) Evolution de la température au niveau de l'espace annulaire

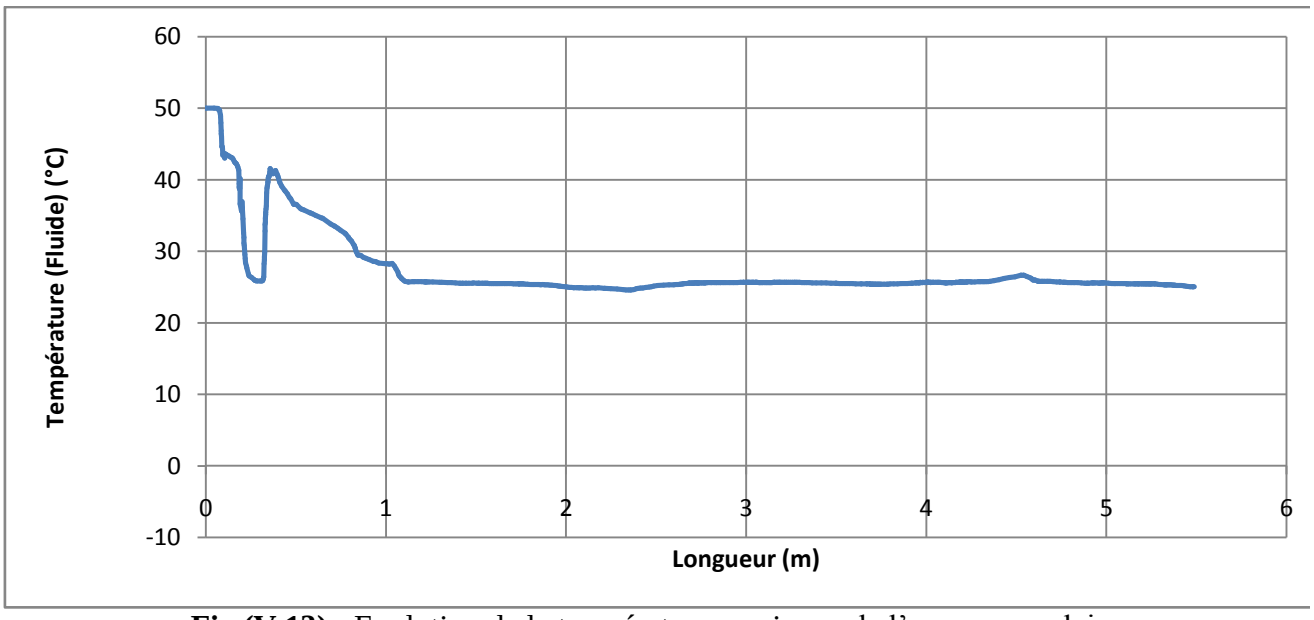


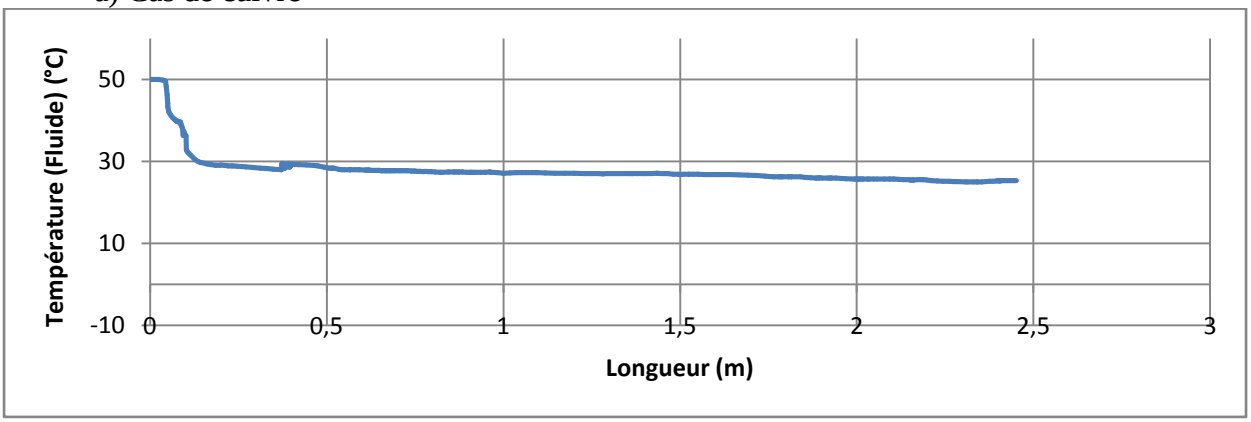
Fig.(V.13) : Evolution de la température au niveau de l'espace annulaire

La température de l'eau caloporteur a baissé d'une manière remarquable à l'entrée du gilet (vers les 27°C) mais, ce choc n'a pas pris beaucoup de temps et que la température retourne rapidement vers les 42°C, ce qui explique que la surface de la cuve interne n'a pas pu sucer la

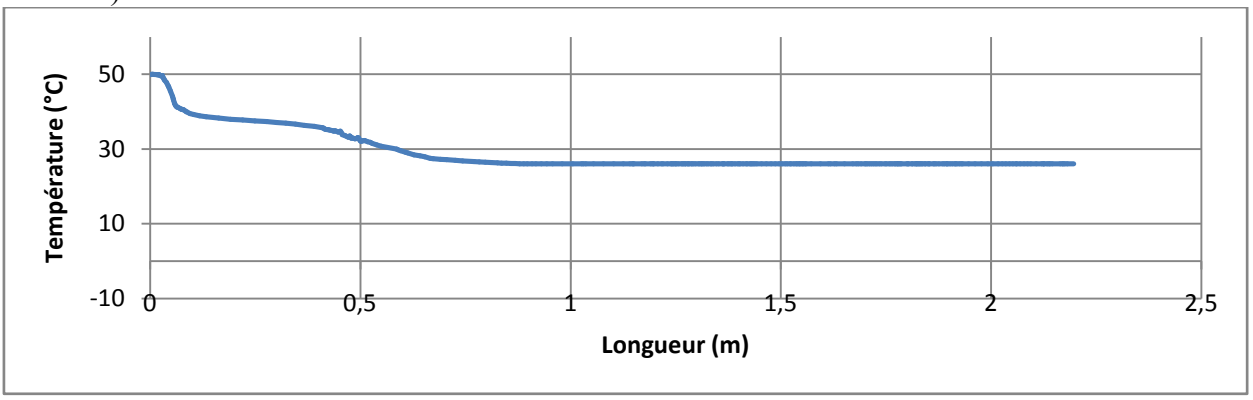
chaleur de l'eau caloporteur d'une manière plus rapide que pour le cas du cuivre puis, elle se dégrade progressivement le long de la cuve jusqu'à ce qu'elle atteint la température ambiante.

V.6) Comparaison d'évolution de la température

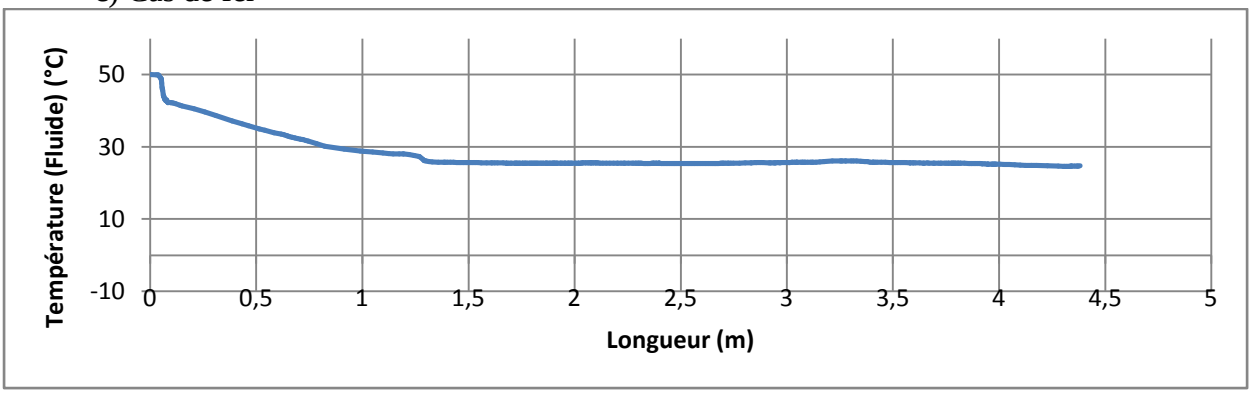
a) Cas de cuivre



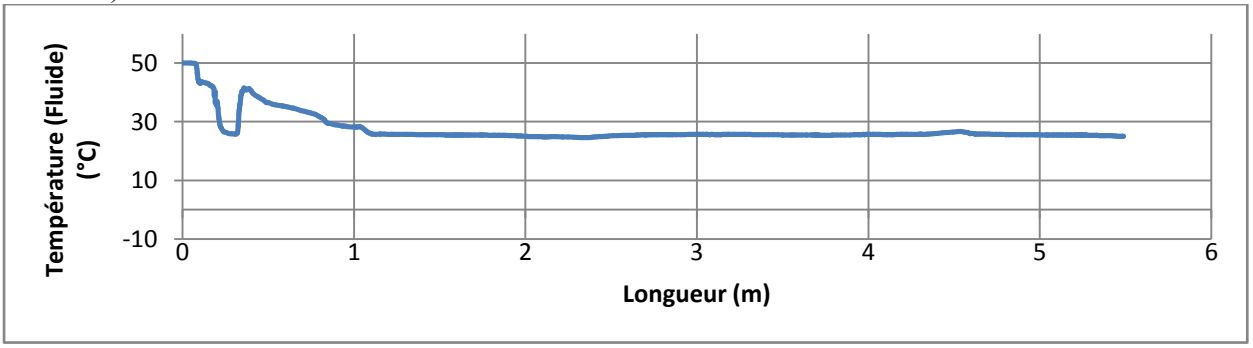
b) Cas d'aluminium



c) Cas de fer



d) Cas d'acier



V.7) Conclusion

Par la comparaison des quatre courbes représentant l'évolution de la température pour les différents matériaux étudiés, on observe que le fluide caloporteur du premier dispositif (cas du cuivre) ont perdu une quantité importante de sa température après un court parcours de 0.5 mètre (atteignent presque 27°C), suivi par le dispositif en aluminium où le fluide caloporteur atteignent presque 32°C, le dispositif en fer à la troisième place (vers les 35°C) et le mauvais dispositif est celui en acier où les particules fluide de son fluide caloporteur sont à une température qui bascule au voisinage de 38°C pour un même parcours (0.5m) de sa trajectoire.

conclusion générale

Conclusion générale

L'étude des transferts thermiques dans la cuve de stockage et son enveloppe d'un système solaire de production d'eau chaude sanitaire a été effectuée. Elle a notamment permit une mise en équations du problème et une résolution numérique à l'aide du code de calcul **SOLIDWORKS**.

Parmi les quatre dispositions envisagées pour les choix des métaux les plus efficaces qui assure un meilleur rendement pour chauffer de l'eau qui est destinée à l'usage domestique, une de ces dispositions, (cuve de stockage en cuivre), assure une meilleur transfert pour le système choisi qui nous permis de dire que le cuivre a une transfert meilleur par rapport au autre métaux (aluminium, fer, acier). Une étude détaillée a été menée, nous a permet de suivre le mécanisme de transfert de chaleur entre le fluide et la cuve de stockage.

Le travail effectué étant basé sur une simulation numérique, les résultats obtenues nous a conduit à postuler que la conduction des métaux se diffère d'un métal à un autre.

Références Bibliographiques

[1] DUFFIE. J.A. et BECKMAN. W.A. (1991): Ingénierie solaire de procédésthermiques. 2ème édition. John Wiley and Sons Inc ISBN 0 -471-51056-4.

[2] VAN KOPPEN, C.W.J., J.P.S THOMAS and W.B. VELTKAMP, paper in sunII,proc.ISES biennial meeting,2,576(1979).

"the actual benefits of thermally stratified storage in small and medium sized solar systems**".**

[3] WUESTLING. M.D. KLEIN. S.A. et DUFFIE. J.A. (1985): Le contrôle des systèmes de chauffe-eau solaire. ASME Engineering Journal de l'énergie solaire, vol. 107, pp 215-221.

[4] FURBO S. et MIKKELSEN S.E. (1987): Les systèmes de chauffage solaire à faible débit, qu'el avantages. Article de ISES (Congrès mondial solaire. Hambourg, Allemagne. Vol. 1, pp 962-966).

[5] HOLLANDS K.G.T. et LIGHTSTONE M.F. (1989):Examen d'un système de chauffe-eau solaire à faible débit. L'énergie solaire, vol.43, pp 97-105.

[6] NAGENDRA RH.TIRUNARAYANA MA et RAMACHANDRAN A. (1970): Etude du transfert de chaleur par la convection libre dans de tube verticaux. Chemical Engineering Science, vol. 25,pp 605-610

[7] Kubair. V.G. et SIMHA. C.R.V. (1982): Etude d'un transfert de chaleur par convection naturelle du mercure entre deux tubes verticaux. Journal International of Heatand masse transfert, vol. 25, pp 399-407.

[8] KEYHANI M, KULACKI F.A. et CHRISTENSEN R.N. (1983): l'effet de la convection libre sur un flux de chaleur constant appliqué à une paroi interne d'un espace annulaire vertical. ASMEJournal of Heat Transfer, vol. 105, pp 454-459.

[9]KHAN J.A. et KUMAR R. (1989): La Convection naturelle dans des tubes verticaux: Une étude numérique d'un flux de chaleur constant appliqué à une paroi interne. ASME Journal of Heat Transfer, vol. 111, pp 909-915.

[10] ROGERS B.B. et YAO L.S. (1990):L'influence de l'instabilité sur le transfert de chaleur par convection mixte dans un espace annulaire vertical. ASME Journal of Heat Transfer, vol. 111, pp 802-919

[11] DHIMDI S et BOLLE L. (1997): L'effet des paramètres géométriques sur la convection naturelle. Actes 4^{éme} Congrès national sur la théorie et de mécanique appliquée, Leuvren, Belgique, pp 43 -46.

[12] El-SHAARAWI M.A.I. et SARHANA. (1980): Effets de la convection libre sur un écoulement laminaire dans des tubes concentriques verticaux. Journal Internationaldes méthodes numériques en ingénierie, vol. 41, pp 41-611.

[**13] ZENEN SRCOLLINS MW et SIMONSON JR (1985):**Combinaison d'une convection d'un système de stockage thermique dans un tube. Journal Internationaldes méthodes numériques en ingénierie, vol. 21, pp 691-711.

[14] TSAY Y.L. (1994):de transfert de chaleur par convection mixte dans un espace annulaire verticale. Revue internationale de l'écoulement de chaleur et des fluides. Vol. 15, pp 226-232.

[15] ROHSENOW W.M , HARTNETT J.P , CHO Y.I (1998). Hanbook of HEAT Transfer. 3rd edition-McGraw-Hill, 1998, ISBN 0-07-053555-8.

[16] SHAH L.J. et FURBO S. (1998): Les corrélations du transfert de chaleur théorique et expérimentale dans des cuves de stockage à double enveloppe faibledébit d'écoulement ECSD. L'énergie solaire, vol. 64, pp 245-256.

[17] SHAHL.J. (1999): Etude et modélisation des conditions thermiques des chauffeseau solaires à faibles débit d'écoulement. Thèse Doctorat. Université Technique du Danemark, université Buildings et de l'énergye .

[18] MORRISON GLNASR A. BEHNIA M. et ROSENGARTEN G. (1998): Analyse des échangeurs de chaleur horizontaux à double enveloppe dessystèmes solaires de production d'eau chaude. SolaireÉnergie, Vol. 64, pp 19-31.

[19]ROSENGARTEN G. BEHNIA M. et MORRISON GL (1999): Quelques aspects relatifs due la modélisation de l'écoulement et le transfert de chaleur dans des échangeurs de chaleur à double enveloppe d'un système solaire. Journal International of Energy Research, vol. 23, pp 1007-1016.

[20]ROSENGARTEN G. (2000): Etude expérimentale et numérique des échangeurs de chaleur à double enveloppe d'un système solaire de production d'eau chaude sanitaire. Thèse Doctorat. École de mécanique et de génie de fabrication, Université du Sud de Nouveau- Galles.

[21] J.-P. Day et al.« Biological chemistry of aluminium studied using 26Al and accelerator mass spectrometry », Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. B, vol. 92, no 1-4, 3 juin 1994, p. 463-468

[22] W. D. Kaehny, A. P. Hegg et A. C. Alfrey,« Gastrointestinal Absorption of Aluminum from Aluminum-Containing Antacids », N. Engl. J. Med., vol. 296, no 24, 16 juin 1977, p. 1389-1390

[23] Sappino AP, Buser R, Lesne L, Gimelli S, Béna F, Belin D, Mandriota SJ.(Division of Oncology, Faculty of Medicine, University of Geneva, Geneva, Switzerland), Aluminium chloride promotes anchorage-independent growth in human mammary epithelial cells [archive], Journal of Applied Toxicology, 6 janvier 2012, DOI:10.1002/jat.1793

[24] Elie Bertrand, Dictionnaire universel des fossiles propres, et des fossiles accidentels contenant une description des terres, des sables, des sels… chez Louis Chamb eau, Avignon, 1763, 606 p., en particulier l'entrée fer p. 239-256.

[25] Robert Luft, Dictionnaire des corps purs simples de la chimie, Nantes, Association Cultures et Techniques, 1997, 392 p. édition cultures et thermiques. Thomson

[26] Bruce Herbert Mahan. Chimie, Inter Edition, Paris, 1977, 832 p. (traduction de University Chemistry, 2^{éme} éditione. Addison-Wesley Publishing Company, Massachusetts, 1969 (ISBN 978-2-7296-0065-5)), en particulier p. 673-676.

[27] Catherine Arminjon, section 2.Le cuivre, le bronze, le laiton, dans l'article « Arts du métal », Encyclopædia Universalis, Corpus 14, 2002, p. 963-977, début d'article [archive]

[28] Centre d'Information du Cuivre.Laiton et Alliages, Jean-Louis Vignes, article « Cuivre », Encyclopædia Universalis, t. 6, 2002, p. 872-878, début en ligne [archive]

[29] J. Philibert, A. Vignes, Y. Bréchet et P. Combrade.Métallurgie, du minerai au matériau, Paris, Dunod, 2002, 2^{éme} éditione.

[30] J.-L. Fanchon. Guide des sciences et technologies industrielles, Paris, Afnor, Nathan, 2010 .