



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
Peoples Democratic Republic of Algeria
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministry of Higher Education and Scientific Research
جامعة أمحمد بوقرة ببومرداس
Université M'Hamed Bougara of Boumerdes
كلية المحروقات والكيمياء
Faculté of Hydrocarbonés and Chemistry



Département Transport et Equipement des Hydrocarbures

MEMOIRE DE FIN D'ETUDES

En vue de l'obtention du diplôme de Master

Spécialité : Hydrocarbures

Option : Génie mécanique : mécanique des unités pétrochimiques

Thème

**Etude numérique de la conduction transitoire au niveau de la
paroi du bac de stockage de GPL**

Présenté par :

NOM Prénom : El Wavi Mariem

Devant le jury composé de :

Mme MEFTAH.S	Professeur	UMBB	Président
Mme YAHL.F	MCB	UMBB	Examineur
M.CHABANI O.	MCB	UMBB	Examineur
Mme TALAMALI. A	MAA	UMBB	Co-Encadrant
M. KHELIFI TOUHAMI M.S	MCA	UMBB	Encadrant

Année universitaire : 2024/2025

إهداء

إلى من تركا راحتهم لأجلي، إلى والدي حفظهما الله لي، إلى المرابطين في سبيل الله، المدافعين عن مسرى رسوله، إلى
الأطفال الذين يموتون جوعاً على مرأى ومسمع من العالم، إلى الصامدين في ساحات القتل رغم الألم والخذلان،
المنتصرين بإذن الله.

Remerciements

En premier lieu, nous remercions Dieu le tout puissant de nous avoir donné le courage et la patience durant toutes ces années d'études. Nous remercions nos parents pour leur soutien moral et matériel durant nos études dans tous les niveaux.

Nous remercions notre encadreur Mr khelifi Touhami M S pour ses idées et ses conseils bénéfiques pour la réalisation de ce mémoire ainsi que notre co-encadreur Mme Talamali pour ses aides précieuses sur l'utilisation du logiciel Ansys. Sans oublier à remercier tous les enseignants du département de transport et équipement des hydrocarbures de l'Université M'Hamed Bougara Boumerdes FHC pour leurs effort déployés durant notre parcours universitaire.

Nos sincères remerciements vont également au président et membres de jury d'avoir accepté de juger ce modeste travail.

En fin nous remercions tous ceux et celles de près ou de loin qui ont contribué à l'élaboration de ce travail.

Résumé

La conduction thermique instationnaire dans les parois des bacs de stockage de GPL est étudiée afin de modéliser l'évolution temporelle de la température et de calculer précisément le flux thermique entrant dans le gaz stocké. Ce transfert thermique dynamique, régi par l'équation de la chaleur, est simulé numériquement à l'aide du logiciel ANSYS, qui utilise la méthode des éléments finis pour résoudre l'équation de conduction transitoire. Cette approche permet de prendre en compte les variations temporelles des conditions thermiques extérieures et internes, telles que les fluctuations ambiantes ou les cycles de charge/décharge. La simulation restitue la distribution spatiale et temporelle des températures dans la paroi, ainsi que le flux thermique qui traverse cette paroi et pénètre dans le volume de GPL. Ce flux entrant est un paramètre clé, car il influence directement la stabilité thermique du gaz, le risque d'évaporation (boil-off) et les contraintes thermomécaniques sur la structure. La résolution thermique instationnaire offre donc un outil puissant pour anticiper ces phénomènes, optimiser l'isolation thermique et renforcer la sécurité des installations. En intégrant cette modélisation dans la conception des bacs, il est possible d'améliorer la gestion des risques liés aux variations rapides de température et de réduire les pertes énergétiques.

Abstract

The unsteady thermal conduction in the walls of LPG storage tanks is studied to model the temporal evolution of temperature and to accurately calculate the heat flux entering the stored gas. This dynamic heat transfer, governed by the heat equation, is numerically simulated using the ANSYS software, which employs the finite element method to solve the transient conduction equation. This approach allows accounting for temporal variations in external and internal thermal conditions, such as ambient fluctuations or loading/unloading cycles. The simulation provides the spatial and temporal distribution of temperatures within the wall, as well as the heat flux that passes through the wall and penetrates the LPG volume. This incoming heat flux is a key parameter, as it directly influences the thermal stability of the gas, the risk of evaporation (boil-off), and the thermomechanical stresses on the structure. The unsteady thermal analysis thus offers a powerful tool to anticipate these phenomena, optimize thermal insulation, and enhance the safety of the installations. By integrating this modeling into tank design, it becomes possible to improve risk management related to rapid temperature variations and reduce energy losses.

ملخص :

تُدرس التوصيلية الحرارية غير المستقرة في جدران خزانات تخزين غاز البترول المُسال بهدف نمذجة التطور الزمني لدرجة الحرارة وحساب التدفق الحراري الداخل بدقة إلى الغاز المخزن. يتم حل معادلة الحرارة عددياً باستخدام برنامج محاكاة يعتمد على طريقة العناصر المحدودة، مما يسمح بأخذ التغيرات الزمنية للظروف الحرارية الداخلية والخارجية في الحسبان، مثل تقلبات الجو أو دورات الشحن والتفريغ. تُظهر المحاكاة التوزيع المكاني والزمني لدرجات الحرارة داخل الجدار، بالإضافة إلى التدفق الحراري الذي يخترقه نحو الغاز، وهو عامل أساسي يؤثر على الاستقرار الحراري وخطر التبخر (boil-off) والضغط الحراري الميكانيكية. وتُعد هذه النمذجة أداة فعّالة لتحسين العزل الحراري وتعزيز أمان المنشآت وتقليل الفاقد الطاقوي من خلال إدراجها في تصميم الخزانات

Contents

Remerciements	iii
Résumé	iv
Abstract	iv
LISTE DES FIGURES	ix
LISTE DES TABLEAUX	x
Abréviations	xi
Introduction Générale	1
Chapitre I : Présentation du complexe GP1/Z et Généralités sur le GPL	5
I.1. Introduction	6
I.2. Description du complexe	6
I.2.1 Présentation du complexe GP1/Z « JUMBO » :	6
Object :	6
I.2.2. Organisation du complexe :	7
I.2.3. Situation :	8
I.2.4. Principales installations :	8
I.3. Capacité :	9
I.4. Alimentation de l'usine :	9
I.5. Les utilités :	9
I.6. Procédé de fabrication	10
I.6.1. Section déshydratation	10
I.6.2. Section séparation	10
I.6.3 Section réfrigération	11
I.6.4 Section d'huile chaude	11
I.6.5 Section de stockage des produits	11
I.6.6 Section Chargement par Camion (CC) :	12
I.7 Généralités sur le Gaz de pétrole liquéfié (GPL)	13
I.7.1 Définition de GPL :	13
I.7.2 Origine du GPL :	13
I.7.3 Composition chimique :	14
I.7.4 Caractéristiques générales des GPL :	15
Tension de vapeur	15
I.7.5 Domaine d'utilisation de GPL :	16
I.7.6 Stockage de GPL	19
I.7.7 Stockage cryogénique :	19

I.7.8 Stockage aérien sous pression	20
Les réservoirs cylindriques	20
I.7.9 Stockage sous talus :	21
I.7.10 Avantages et inconvénients de GPL.....	22
Chapitre II : Revue bibliographique	23
II.1 Études précédentes sur la conduction transitoire dans les parois de réservoirs.....	24
II.2 Concepts fondamentaux du transfert de chaleur : conduction, convection, rayonnement	26
II.2.1. Introduction.....	27
II.2.2 Les trois modes de transfert de chaleur.....	27
II.2.3 Etude de Transfert de chaleur par conduction en régime permanent.....	29
II.2.3.1 Transfert unidirectionnel.....	29
II.3 Théorie de la conduction thermique instationnaire (équation de la chaleur, conditions initiales et aux limites)	32
II.3.1. Équation fondamentale de la conduction transitoire.....	32
II.4 Présentation des méthodes de simulation numérique appliquées à la conduction instationnaire	33
II.4.1. Méthodes numériques utilisés.....	33
II.4.2. Avantages des simulations numériques	34
II.4.4. Application pour la paroi du réservoir	34
II.5. Présentation des méthodes de simulation numérique appliquées à la conduction instationnaire.	35
II.5.1. Méthode des différences finies (MDF)	35
II.5.2. Méthode des éléments finis (MEF).....	35
II.5.3. Méthode des volumes finis (MVF)	35
II.5.4. Méthodes temporelles	36
Chapitre III : Simulation Numérique	37
III.1. Introduction	38
III.2. Description du bac de stockage de GPL.....	38
III. 3. Paramètres de fonctionnement de bac de stockage	39
III.4. Structure du bac T0001 :	41
III. 3. Modèle utilisé par le logiciel :	43
III.4. Condition aux limites	44
III.5. Description de la géométrie.....	44
Chapitre IV : Résultats et discussions :	46
IV.1. Evolution de profil des températures en fonction de l'épaisseur à $h=10$	47
IV.2. Evolution de profil des températures en fonction de l'épaisseur $h=90$:	52

IV.3. Représentation des variations de la température en fonction de la paroi à $h=10\text{W/m}^2\text{K}$	
IV.7.4. Représentation des variations de la température en fonction de la paroi à $h=90\text{W/m}^2\text{K}$	61
Conclusion générale	66
Bibliographie	67

LISTE DES FIGURES

FIGURE I. 1 LES TRAINS DANS COMPLEXE GPL	6
FIGURE I. 2:ORGANIGRAMME DU COMPLEXE.....	7
FIGURE I. 3:VUE GENERALE DES BACS DE STOCKAGE.....	12
FIGURE I. 4:SCHEMA SYNOPTIQUE DU PROCEDE DE LIQUEFACTION DU GPL	13
FIGURE I. 5:ORIGINE DU GPL	14
FIGURE I. 6: UTILISATION DE GPL DANS LA CUISINE	17
FIGURE I. 7: UTILISATION DE GPL POUR LE CHAUFFAGE	18
FIGURE I. 8: UTILISATION DE GPL COMME CARBURANT AUTOMOBILE	18
FIGURE I. 9: ELEMENTS CONSTITUTIFS D'UN RESERVOIR CRYOGENIQUE	20
FIGURE I. 10: EXEMPLE D'UN RESERVOIR CYLINDRIQUE.....	20
FIGURE I. 11: EXEMPLE D'UN RESERVOIR SPHERIQUE	21
FIGURE I. 12: EXEMPLE D'UN RESERVOIR SOUS TALUS.....	21
FIGURE II. 1: TRANSFERT DE CHALEUR CONDUCTIF	27
FIGURE II. 2: SCHEMA DE TRANSFERT DE CHALEUR CONVECTIF	28
FIGURE II. 3: SCHEMA DE TRANSFERT DE CHALEUR RADIATIF.....	28
FIGURE II. 4: BILAN THERMIQUE ELEMENTAIRE SUR UN MUR SIMPLE	29
FIGURE II. 5: SCHEMA DE FLUX ET TEMPERATURE DANS UN MUR MULTICOUCHES	30
FIGURE II. 6: SCHEMA DU TRANSFERT DE CHALEUR DANS UN CYLINDRE CREUX	30
FIGURE II. 7 : SCHEMA DE TRANSFERT DE LA CHALEUR DANS UN CYLINDRE CREUX MULTICOUCHE	31
FIGURE III. 1 VUE GENERALE DE BAC DE STOCKAGE DE PROPANE T0001	ERREUR ! SIGNET NON DEFINI.
FIGURE III. 2: SCHEMA DE BAC T0001	ERREUR ! SIGNET NON DEFINI.
FIGURE IV. 1: DESCRIPTION DE LA GEOMETRIE UTILISEE DANS LA SIMULATION	ERREUR ! SIGNET NON DEFINI.
FIGURE IV. 2: VUE APPROCHEE DU MAILLAGE DE LA PAROI	ERREUR ! SIGNET NON DEFINI.

LISTE DES TABLEAUX

TABLEAU I. 1:SYMBOLES DES DEPARTEMENTS.	8
TABLEAU I. 2:COMPOSITION DE GPL	15
Tableau II. 1 utilisation de logiciel.....	34
TABLEAU III. 1: PRESSION DE SERVICE DU BAC T0001.....	39
TABLEAU III. 2: DEBIT ET TEMPERATURE D'ENTRE ET DE SORTIE DU BAC T0001.....	40
TABLEAU III. 3: DEBIT ET TEMPERATURE D'ENTRE ET DE SORTIE DU BAC T0001.....	40
TABLEAU III. 4: CARACTERISTIQUE DU PRODUIT STOCKE	41
TABLEAU III. 5 : LA CONDUCTIVITE THERMIQUE DES MATERIAUX DE BAC T0001	42
TABLEAAU IV. 1: PROPRIETES DES MATERIAUX UTILISES	ERREUR ! SIGNET NON DEFINI.

Abréviations

BOG : Boil-Off Gas (gaz de vapeur en off)

CC : Section chargement par Camion

FDM :Méthode des différences finies

GPL : Gaz de Pétrole Liquéfié

GP1/Z : complexe de gaz de pétrole 1 d'Arzew

GNL : Gaz naturel liquéfié

MEF : méthode des éléments finis

MVF : la méthode des volumes finis

NOX : d'oxydes d'azote

PCM : matériaux à changement de phase

PUF : polyuréthane expansé

RTO : région de transport ouest

Introduction Générale

Introduction Générale

La conduction thermique est un mode fondamental de transfert de chaleur, qui se produit par transmission d'énergie thermique à travers un matériau sans déplacement macroscopique de matière. Ce phénomène est régi par la loi de Fourier, selon laquelle le flux thermique est proportionnel au gradient de température dans le matériau. Dans le cas des bacs de stockage, tels que les bacs de GPL (Gaz de Pétrole Liquéfié), la maîtrise de la conduction thermique à travers leurs parois est essentielle pour assurer la sécurité, la stabilité thermique du produit stocké et limiter les pertes énergétiques.

L'étude de la conduction instationnaire (ou transitoire) est particulièrement importante car elle permet de comprendre et de modéliser l'évolution temporelle de la température dans la paroi du bac lorsque les conditions thermiques extérieures ou internes varient dans le temps. En effet, contrairement à la conduction en régime permanent où les températures sont stables, la conduction instationnaire décrit les phénomènes de transfert thermique lorsque le système est soumis à des variations, telles que des fluctuations de la température ambiante, des cycles de charge/décharge, ou des événements thermiques exceptionnels.

L'objectif du mémoire est d'étudier la conduction thermique instationnaire dans les parois des bacs de stockage, notamment ceux de GPL, afin de comprendre l'évolution temporelle de la température sous des conditions thermiques variables. Cette étude vise à analyser les phénomènes de transfert thermique transitoires pour améliorer la sécurité, la performance énergétique et la gestion des risques liés aux variations rapides de température. Pour cela, le mémoire s'appuie sur des simulations thermiques transitoires réalisées avec ANSYS, permettant de modéliser précisément le comportement dynamique de la conduction et d'optimiser la conception des bacs dans des conditions réelles d'utilisation.

Dans les bacs de stockage, cette étude est cruciale pour plusieurs raisons :

Sécurité : Les variations rapides de température peuvent engendrer des contraintes thermiques importantes dans la paroi, susceptibles de provoquer des déformations, fissures ou défaillances mécaniques.

Performance énergétique : Comprendre la dynamique thermique permet d'optimiser l'isolation et de réduire les pertes de chaleur, ce qui est essentiel pour le maintien de la qualité et de la pression du gaz stocké.

Introduction Générale

Gestion des risques : En cas d'incendie ou de surchauffe, la simulation de la conduction instationnaire aide à prévoir la montée en température de la paroi et à concevoir des dispositifs de protection adaptés.

Ainsi, l'étude approfondie de la conduction instationnaire dans les parois des bacs de stockage, notamment par des outils de simulation numérique comme ANSYS, offre un moyen efficace d'analyser

ces phénomènes complexes et de proposer des solutions techniques adaptées pour améliorer la sécurité et la durabilité des installations.

Cette présentation met en lumière le contexte industriel et scientifique de l'étude, ainsi que les enjeux pratiques liés à la conduction thermique instationnaire dans les parois des bacs de stockage.

La simulation thermique transitoire réalisée avec ANSYS permet de capturer le comportement dynamique du transfert de chaleur, ce qui est essentiel pour anticiper les contraintes thermiques et améliorer la conception des bacs de stockage dans des conditions réelles d'utilisation¹⁹.

Cette formulation est précise, technique et met en avant la valeur ajoutée de la simulation ANSYS dans l'étude de la conduction instationnaire.

ANSYS est un logiciel de simulation numérique largement utilisé dans le domaine de l'ingénierie pour résoudre des problèmes complexes de mécanique des structures, de dynamique des fluides, d'électromagnétisme et de transfert de chaleur. Il est basé sur la méthode des éléments finis, qui consiste à diviser une structure en un grand nombre d'éléments plus petits pour lesquels les équations physiques sont résolues de manière approchée. Pour la simulation thermique, ANSYS offre des fonctionnalités avancées permettant de modéliser la conduction, la convection et le rayonnement, en régime permanent ou transitoire. Il permet de définir des matériaux avec des propriétés thermiques variables, d'appliquer des conditions aux limites complexes et d'obtenir des résultats précis sous forme de champs de température, de flux de chaleur, etc. Les capacités de simulation thermique d'ANSYS incluent également des outils spécifiques pour la simulation du refroidissement électronique (Ansys Icepak), et la gestion thermique dynamique. ANSYS est utilisé dans divers domaines tels que l'aéronautique, l'automobile, l'énergie et l'électronique.

Introduction Générale

Plan du mémoire

Ce mémoire est structuré en plusieurs parties :

1. Une introduction générale présentant le contexte, l'importance de l'étude et les objectifs du mémoire.
2. Présentation de complexe GP1/Z et Généralités sur le GPL.
3. Une revue bibliographique des concepts fondamentaux de la conduction thermique instationnaire et des méthodes de simulation numérique.
4. La modélisation physique et mathématique du problème de conduction transitoire à travers la paroi du bac.
5. La mise en œuvre de la simulation numérique avec ANSYS, incluant la création de la géométrie, le maillage et la définition des conditions aux limites.
6. L'analyse des résultats de la simulation, avec une étude de l'influence des paramètres clés comme la variation de conditions climatiques, isolants, flux entrant etc.
7. Une discussion critique des résultats et une proposition d'améliorations possibles pour les travaux futurs.
8. Une conclusion générale résumant les principaux résultats et perspectives de ce travail.
9. Des annexes contenant des informations complémentaires (codes ANSYS, données thermo physiques, etc.) et une bibliographie listant les références utilisées.

Chapitre I : Présentation du complexe GP1/Z et Généralités sur le GPL

Chapitre I : Présentation de complexe GP1/Z et Généralités sur le GPL

I.1. Introduction

L'installation GP1Z est une entreprise du secteur gazier spécialisée dans la production de propane et de butane, avec un volume atteignant neuf millions de tonnes par an. Son processus repose sur l'extraction de GPL provenant du sud algérien par le biais du RTO (région de transport ouest). On le classe parmi les grands complexes en raison de sa taille et de sa qualité, qui répond constamment aux exigences du marché national et international.

I.2. Description du complexe

I.2.1 Présentation du complexe GP1/Z « JUMBO » :

Object :

Installation importante, édifiée dans la zone industrielle d'ARZEW, visant à traiter le mélange brut GPL pour produire du propane et du butane destinés au commerce.

Historique :

- Le contrat de construction passé avec « IHI-C-ITOH JAPON » le 11 Décembre 1978.
- L'ouverture du chantier le 10 Octobre 1980.
- L'inauguration officielle le 31 Décembre 1983.
- Le chargement du premier navire de propane réfrigéré le 20 Février 1984.
- L'extension du complexe : -Phase II le 24 février 1998 (deux trains)
-Phase III le 24 février 2010 (trois trains) [1].



Figure I. 1 Les Trains dans Complexe GPL

Chapitre I : Présentation de complexe GP1/Z et Généralités sur le GPL

I.2.2. Organisation du complexe :

La description des structures nous permet de connaître la situation géographique, l'effectif, les objectifs et le rôle de chaque département ainsi de connaître tout le fonctionnement du complexe GP1/Z. Le complexe GP1/Z est géré suivant un organigramme bien déterminé de façon à bien maîtrisé les tâches, il est composé d'une direction générale et deux sous-directions et des départements de contrôle, comme le montre l'organigramme suivant:

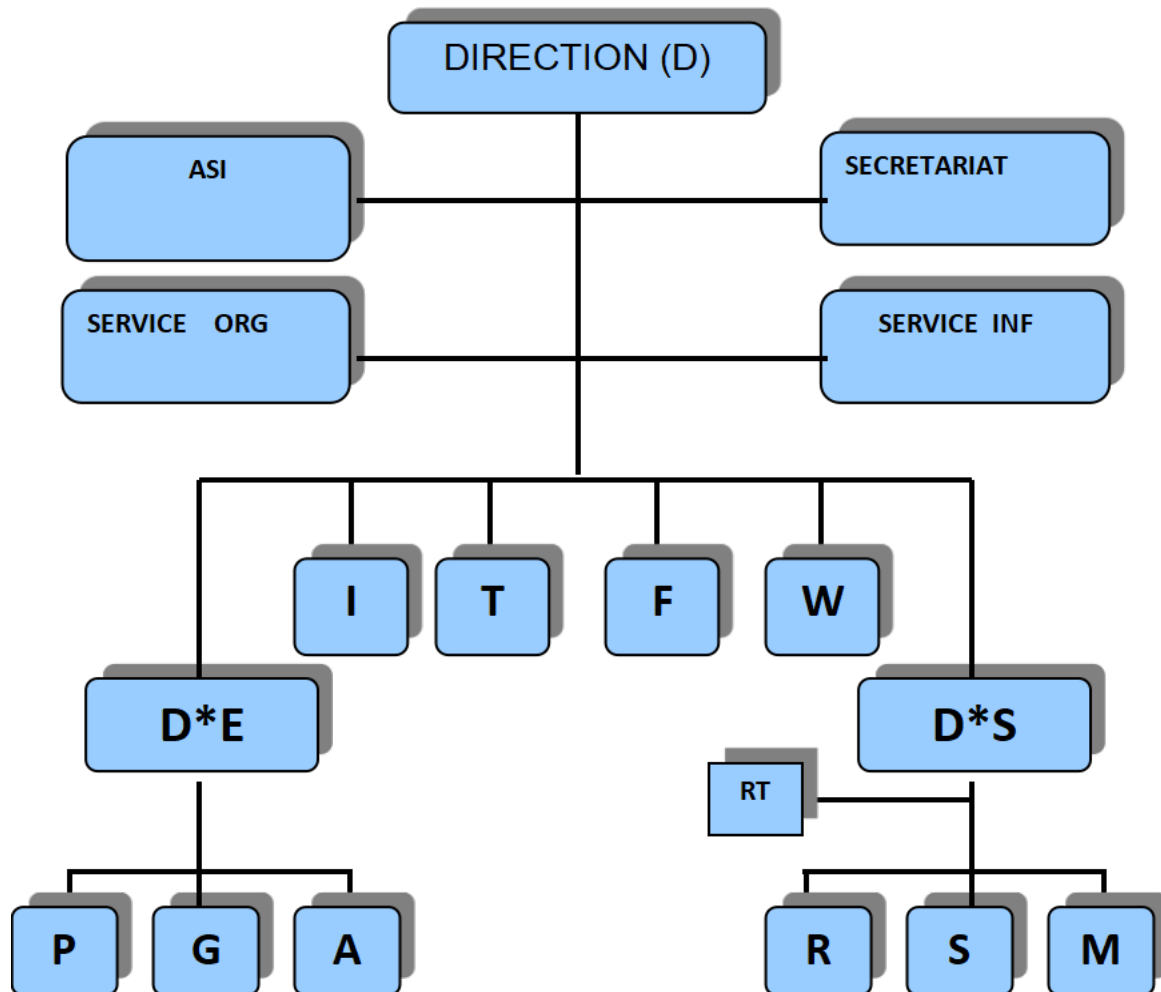


Figure I. 2:Organigramme du complexe.

Chapitre I : Présentation de complexe GP1/Z et Généralités sur le GPL

Tableau I. 1: Symboles des départements.

SYMBOLES	DEPARTEMENT	SYMBOLES	DEPARTEMENT
D	La Direction	ORG	Organisation
I	Département Sécurité	T	Département Technique
F	Département Finance	W	Département Travaux neufs
D*E	Département Exploitation	D*S	Sous-Direction du personnel
P	Département Production	RT	Relation de Travail
G	Département Maintenance	R	Département Ressources Humaines
A	Département Approvisionnement	S	Administration et social
M	Département moyens généraux	ASI	Assistance sûreté interne

I.2.3. Situation :

D'une superficie de 120 hectares, le complexe GP1.Z est situé dans la zone industrielle d'ARZEW, entre la centrale thermique (MERS EL HADJAJ) à l'EST et le complexe GL/Z à l'OUEST, entre la mer Méditerranée et la route nationale N°1.1.

I.2.4. Principales installations :

22 Sphères de stockage de la charge d'alimentation de 1 000 m³ chacune.

09 Trains de traitement du GPL.

02 Unités de re liquéfaction du gaz évaporé.

04 Bacs de stockage de propane basse température de 70 000 m³ chacun.

04 Bacs de stockage de butane basse température de 70 000 m³ chacun.

04 Sphères de stockage de produit à température ambiante (propane et butane) de 500 m³ chacune.

01 Sphère de stockage gazoline.

Chapitre I : Présentation de complexe GP1/Z et Généralités sur le GPL

02 Salles de contrôle.

01 Sous-station électrique alimentée par la SONEGAS.

04 Générateurs assurant l'énergie de secours du complexe en cas de coupure de courant.

02 Quais de chargement pouvant recevoir des navires d'une capacité entre 4 000 et 5 000 tonnes.

Une rampe de chargement de camions.

Une station de pompage d'eau de mer pour le réseau d'incendie.

Un système de télésurveillance.

I.3. Capacité :

Suite au traitement du GPL brut algérien provenant des champs gaziers et pétroliers situés dans le sud, le complexe produit 10.800.000 tonnes par an de GPL, incluant du propane, des butanes commerciaux et du pentane [1].

I.4. Alimentation de l'usine :

L'usine reçoit son alimentation de GPL des sources suivantes : Hassi Messaoud, Hassi R'mel, Alrar, In amenas, Tinfouye Taban Kort (TFT), Rhourde Nouss, Gassi Touil [1].

I.5. Les utilités :

Elle alimente les diverses zones de production en :

- Fuel (gaz naturel) : utilisé comme combustible.
- Air : elle est divisée en deux :
 - ✓ Air instrument : C'est de l'air séché après enlèvement de l'humidité, cet air aide pour ouvrir les vannes et la manipulation des boucles de régulation (vanne pneumatique).
 - ✓ Air service : C'est du l'air qui sert pour le nettoyage et l'entretien.
- Vapeur : On utilise le dessaleur pour avoir l'eau distillée et à partir de la chaudière on produit de la vapeur.
- Eau :
 - ✓ L'eau distillée.
 - ✓ L'eau de refroidissement.
 - ✓ L'eau potable.
- Méthanol : Il est utilisé pour le dégivrage.

Chapitre I : Présentation de complexe GP1/Z et Généralités sur le GPL

- Gasoil : Il est utilisé pour les générateurs de secours.
- Azote : Ballon d'azote, il y'a deux circuits
- ✓ Circuit Gazeuse (HELIOS).
- ✓ Circuit l'azote liquide (COGIZ) : On le transforme en vapeur pour l'inertage des équipements.
- Un générateur électrique de secours d'une capacité de 25.617 KW.
- Un système de sécurité vide-vite (blow-down).
- Les torches : deux hautes pressions et une basse pression sert à brûler la quantité de gaz provoquée par un dysfonctionnement des trains.

I.6. Procédé de fabrication

Le GPL importé est conservé dans 22 cuves sphériques situées dans la zone de stockage de la charge, puis le GPL brut est dirigé vers les 9 unités identiques mises en place côte à côte. Chaque train est élaboré pour générer 10.800.000 tonnes par an et intègre les sections ci-après:

I.6.1. Section déshydratation

L'objectif de cette partie est de minimiser le contenu en humidité à 100 ppm, puis à 5 ppm dans le déshydrateur de charge et à environ 1 ppm dans le déshydrateur de garde (dans la section dédiée au refroidissement), afin d'empêcher l'apparition de givre sur les équipements suivants.

I.6.2. Section séparation

Le Gaz de Pétrole Liquéfié issu du processus de déshydratation est introduit dans les fractionneurs à un débit nécessaire pour obtenir la quantité souhaitée de produits.

Passage par les préchauffeurs :

Le GPL déshydraté est introduit dans les Fractionneurs à une température de 71°C, suite à son passage par trois préchauffeurs.

Fractionneurs :

Il s'agit d'une colonne de séparation dotée de 55 niveaux équipés de clapets. C'est dans cette colonne qu'on procède à la récupération de l'éthane et du propane en tête, alors que le butane et le pentane seront récupérés en partie inférieure. Le produit principal du Fractionneurs est dirigé vers le dé-Déethaniseur via une pompe de reflux, qui gère à la fois le débit vers le dé-éthaniseur et le reflux du fractionneur. Le butane qui provient du fond est orienté vers la zone de réfrigération.

Chapitre I : Présentation de complexe GP1/Z et Généralités sur le GPL

Dé-éthaniseur :

Il s'agit d'une colonne de séparation dotée de 25 plateaux équipés de clapets. Cette colonne sert à la séparation de l'éthane présent dans le propane, l'éthane étant récupéré au sommet tandis que le propane est extrait à la base de la colonne.

Dépentaniseurs :

Il s'agit d'une colonne de séparation dotée de 50 plateaux à clapets. Cette colonne sert à retirer le pentane du butane en fonction de la concentration en pentane du mélange d'alimentation, son fonctionnement est conditionné par une proportion de butane supérieure à 10% dans ce dernier.

I.6.3 Section réfrigération

Cette partie traite le propane et le butane provenant de la section de séparation, les refroidit jusqu'aux températures correspondant aux points de saturation liquide près de la pression atmosphérique, puis les achemine vers les réservoirs de stockage à basse température. Les deux produits, propane et butane, sont refroidis à travers trois refroidisseurs (schillers) selon un cycle ouvert par détente successive en trois niveaux de pression HP, MP et BP suite à la compression du propane (agent réfrigérant).

Les vapeurs issues de l'évaporation du propane réfrigérant dans les schillers et les condenseurs de tête du dé-éthaniseur sont recueillies dans trois ballons d'aspiration HP, MP et BP. Ces dernières sont ensuite aspirées par le compresseur centrifuge propulsé par une turbine à gaz lors de la phase I, puis par un moteur électrique durant la phase II et III. Elles sont finalement condensées au sein des condenseurs de type aéro-réfrigérant (E-X027).

I.6.4 Section d'huile chaude

La portion du fluide caloporteur est employée en tant que source de chaleur pour les rebouilleurs des colonnes de fractionnement et pour le réchauffement final de la charge. L'huile TORADA TC 32 circule dans la boucle en tant que fluide caloporteur.

Le four (H-X501) assure aussi la chaleur requise pour le gaz naturel en vue de la régénération des tamis moléculaires de la section déshydratation, tout en réchauffant ce dernier dans un petit serpentin de la section convection à une température stable de 280°C avec un débit de 2000 Nm³/h.

I.6.5 Section de stockage des produits

Il existe deux types de stockage :

Chapitre I : Présentation de complexe GP1/Z et Généralités sur le GPL

Stockage à température ambiante :

Destiné à la vente de gaz à l'échelle nationale, le chargement des camions s'effectue grâce aux quatre sphères ayant un volume de 500 m³ chacune, où le propane et le butane sont conservés sous pression.

Stockage à basses températures :



Figure I. 3: Vue générale des bacs de stockage

Les gaz réfrigérés sont transportés vers les réservoirs où ils seront conservés à une température basse. Chaque réservoir a une capacité de 70 000 m³ et est équipé de pompes submersibles pour faciliter la circulation du gaz et le chargement des navires.

I.6.6 Section Chargement par Camion (CC) :

Prend en charge l'organisation des chargements par camion à la rampe dédiée, notamment pour les clients NAFTAL et les opérateurs privés. Par le biais du système de contrôle distribué (DCS) déployé dans l'ensemble des installations, nous avons la possibilité d'afficher et d'accéder à toutes les informations.

Chapitre I : Présentation de complexe GP1/Z et Généralités sur le GPL

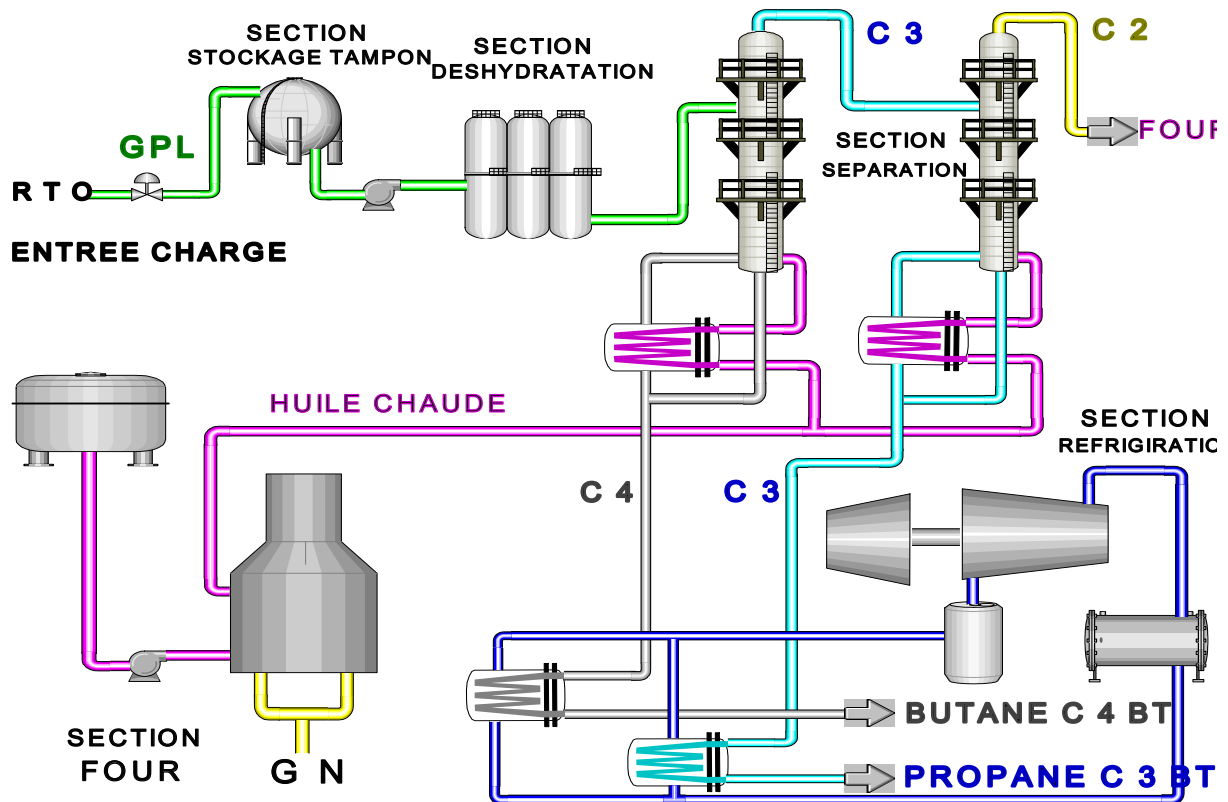


Figure I. 4:Schéma synoptique du procédé de liquéfaction du GPL

I.7 Généralités sur le Gaz de pétrole liquéfié (GPL)

I.7.1 Définition de GPL :

Le GPL est un mélange gazeux majoritairement constitué de butane et de propane à température ambiante et pression atmosphérique, qui peut se transformer en liquide dans les conditions suivantes :

- Pression relevée à la température ambiante.
- Pression atmosphérique et basse température.
- Pression modérée et température pas tellement basse.

Cette propriété lui permet d'être stocké dans un volume réduit (250 litres de GPL gazeux égale à un litre de GPL liquide).

I.7.2 Origine du GPL :

Les gaz de pétrole liquéfié GPL sont extraits à partir de diverses sources qui peuvent être :

- Dans les raffineries de pétrole : Le processus de raffinage du pétrole est complexe et Nécessite de nombreuses étapes :
- Soit au cours de la distillation du pétrole brut (le butane et le propane constituent entre

Chapitre I : Présentation de complexe GP1/Z et Généralités sur le GPL

2 et 3 % de l'ensemble des produits obtenus ; ils constituent les coupes les plus légères issues de cette opération).

- Soit pendant le craquage thermique ou reforming catalytique des produits en vue de Produire des essences.
- Au cours des opérations de dégazolinage du gaz naturel qui ont pour but de séparer et de recueillir les condensats (propane, butane, essences légères etc...). Environ 3% d'un baril standard de pétrole brut est raffiné en GPL, alors que jusqu'à 40% du baril pourrait être converti en GPL.



Figure I. 5: Origine du GPL

- Dans les unités de liquéfaction : En moyenne, un champ de gaz naturel fournit près de 90 % de méthane (CH_4) mais aussi 5 % de propane et 5 % d'autres gaz dont le butane.
- À partir de la liquéfaction des gaz associés (champs pétroliers).
- Comme sous-produit à partir des unités de liquéfaction du gaz naturel GNL

1.7.3 Composition chimique :

La composition chimique du GPL peut varier en fonction de son origine et des normes applicables. Ce dernier peut inclure du propylène, du butène, une petite quantité de méthane, d'éthylène, de pentane et occasionnellement du butadiène, de l'acétylène et du méthyle acétylène. Dans le butane et le propane, chaque atome est connecté à un autre par des liaisons simples (ou covalentes), ce qui indique que ces atomes liés partagent un électron de leurs couches externes pour créer des doublets d'électrons qui assurent l'attraction entre eux.

Chapitre I : Présentation de complexe GP1/Z et Généralités sur le GPL

Tableau I. 2:Composition de GPL

La composition de GPL	% molaire
Méthane	0.32
Ethane	1.12
Propane	60.95
Iso butane	15.46
Normal butane	22.14
Iso pentane	

I.7.4 Caractéristiques générales des GPL :

Formule chimique :

Le propane et le butane appartiennent à la famille des alcanes, dont la formule générale est C_nH_{2n+2} , Le propane a pour formule chimique C_3H_8 , tandis que celle du butane est C_4H_{10} . [2]

Odeur :

Le GPL est inodore à l'état naturel, mais on doit ajouter un odorant, ce sont des composés sulfures tel que le diéthylmercaptane ou le diméthylsulfide pour des raisons de sécurité. [2]

Tension de vapeur :

C'est la pression à laquelle est maintenu un gaz à l'intérieur d'un récipient pour qu'il reste à l'état liquide. Le GPL soumis à des températures supérieures aux points d'ébullition du propane et du butane qui ne peuvent être amenés à l'état liquide que sous pression ou par réfrigération.

Le GPL à une tension de vapeur à 20 °C égale à :

- Pour le butane = 2 bars ;
- Pour le propane = 8 bars.

À noter que plus la température est élevée plus la pression augmente.

Dilatation :

A l'état liquide, le GPL a un coefficient de dilatation très élevé, ce qui doit être pris en compte lors de son stockage. Par exemple, les sphères ne doivent jamais être complètement remplies

Chapitre I : Présentation de complexe GP1/Z et Généralités sur le GPL

Densité :

À l'état gazeux, le GPL est plus lourd que l'air ; la densité du propane égale à 0,51 et celle du butane égale à 0,58. [4]

Température d'ébullition :

La température d'ébullition du propane est de (-42 °C) et celle du butane est de (-0.5 °C) à une pression atmosphérique standard (1.013 bar) [4].

Pouvoir calorifique :

C'est une propriété très intéressante étant donné que le GPL est traditionnellement utilisé pour différents besoins domestiques :

- = Isobutane : PCI = 29 460 (kcal/kg)
- = Butane normal : PCI = 29 622 (kcal/kg)
- = Propane : PCI = 22 506 (kcal/kg) [3]

Impuretés :

Le GPL n'est pas parfaitement pur dont le soufre est parmi les plus importantes impuretés, alors que sa teneur dans le GPL est inférieure ou égale à 0.005% en masse, mais aussi il faut tenir en compte l'eau.

Autres caractéristiques de GPL :

- Le GPL manque de propriétés lubrifiantes, et cette caractéristique doit être considérée lors de la conception des équipements fonctionnant au GPL tels que les échangeurs, les pompes et les compresseurs.
- Le GPL n'est pas toxique, cependant, il a un effet légèrement anesthésiant s'il est inhalé pendant une longue durée.
- Le GPL a un poids spécifique approximativement égal à la moitié de celui de l'eau.
- Le GPL n'est pas corrosif, et ce pour divers matériaux.
- Etat gazeux à température ambiante.

I.7.5 Domaine d'utilisation de GPL :

Grâce à son fort pouvoir calorifique, sa pureté, sa combustion propre et sa commodité de transport, le GPL répond à une grande variété d'usages et est utilisé dans plusieurs domaines tels que :

Chapitre I : Présentation de complexe GP1/Z et Généralités sur le GPL

Pétrochimie :

Le butane, et en particulier le propane, sont largement utilisés dans le domaine de la pétrochimie pour la fabrication de nombreux sous-produits que nous utilisons habituellement dans notre vie quotidienne.

Production d'électricité :

Le GPL est privilégié dans le domaine de la production d'électricité en raison de sa grande capacité à atteindre des rendements très élevés. C'est un combustible propre par rapport aux autres combustibles, ce qui le rend écologique. De plus, du point de vue de la diversification, il est stratégique.

Climatisation :

Il est utilisé pour la construction des réfrigérateurs et des climatiseurs (moyenne capacité) grâce à sa détente d'absorption de la chaleur et de créer le froid.

Cuisson :

Le GPL (butane ou propane) est couramment utilisé comme source d'énergie pour la cuisine en raison de sa disponibilité, de sa combustion propre et de son efficacité. Les cuisinières à gaz, équipées de brûleurs réglables, permettent un contrôle précis de la température. Grâce à leur capacité à chauffer rapidement et à maintenir une température constante, de nombreux consommateurs préfèrent les appareils fonctionnant au GPL plutôt qu'aux combustibles traditionnels comme le bois, le charbon ou les résidus de récolte.

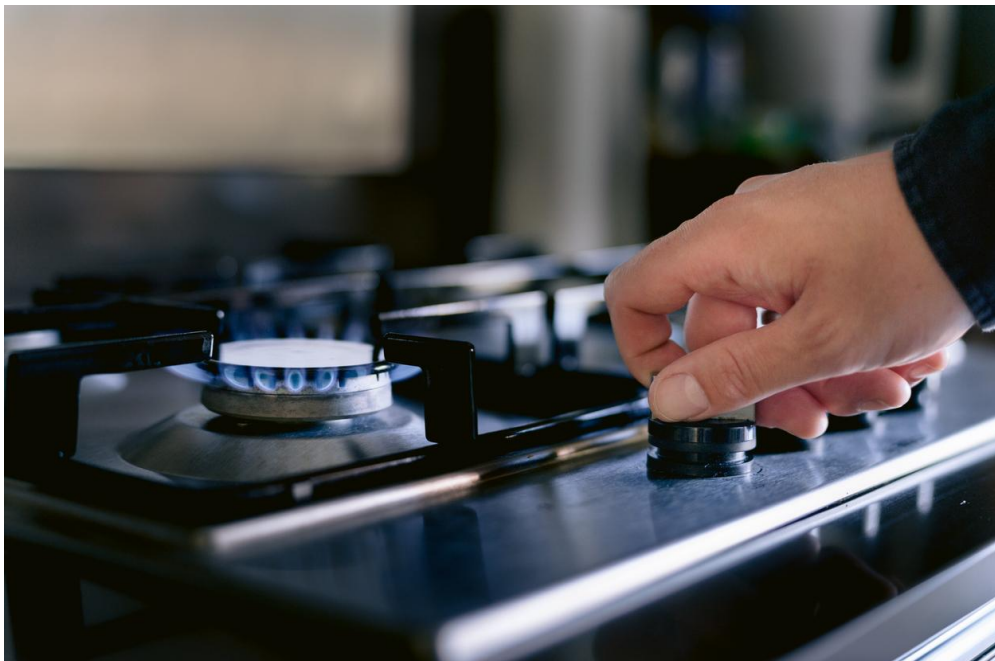


Figure I. 6: Utilisation de GPL dans la cuisine

Chapitre I : Présentation de complexe GP1/Z et Généralités sur le GPL

Chauffage :

Pour le chauffage central ou les chauffe-eaux



Figure I. 7: Utilisation de GPL pour le chauffage

Comme carburants :

Le GPL est souvent utilisé comme carburant pour les véhicules, les bateaux et les chariots élévateurs en raison de sa grande efficacité et de ses performances. De plus, il engendre de très faibles émissions de polluants.



Figure I. 8: Utilisation de GPL comme carburant automobile

Chapitre I : Présentation de complexe GP1/Z et Généralités sur le GPL

Autres utilisations :

- Fabrication de produits insecticides.
- Fabrication de caoutchouc.
- Utilisation en tant que combustible pour les chalumeaux.
- Chauffage de bacs d'acide.

I.7.6 Stockage de GPL

Les fabricants emploient des réservoirs de diverses configurations et structures, pensés pour s'ajuster de façon logique et économique aux spécificités du produit à stocké. L'agencement d'un réservoir est soumis à deux exigences fondamentales : la préservation du produit en réduisant ou en prohibant les évaporations, et la capacité de la construction à résister à la pression interne produite par le produit.

La pression de stockage dépend essentiellement de deux facteurs principaux : la nature du produit stocké et la température de stockage. Il existe trois grands modes de stockage :

- Stockage à pression atmosphérique (cryogénique)
- Stockage aérien sous pression
- Stockage souterrain.

I.7.7 Stockage cryogénique :

L'idée de stocker le GPL par cryogénie est basée sur la liquéfaction du gaz via un refroidissement à des températures extrêmement basses à pression atmosphérique. Cette méthode permet de diminuer considérablement l'espace que peut occuper le gaz tout en favorisant la sécurité avec une pression réduite. Cette approche est spécialement conçue pour le stockage de grands volumes de GPL dans des terminaux de stockage ou des installations industrielles, ainsi que pour le transport maritime à travers des méthaniers dotés de réservoirs cryogéniques isolés thermiquement afin de conserver les températures basses.

Chapitre I : Présentation de complexe GP1/Z et Généralités sur le GPL

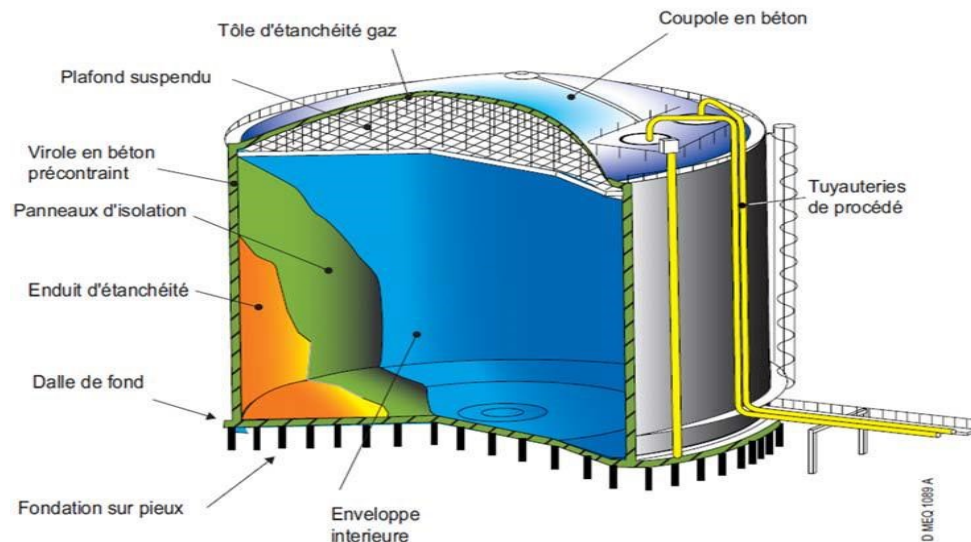


Figure I. 9: Eléments constitutifs d'un réservoir cryogénique

I.7.8 Stockage aérien sous pression

Le mode de stockage le plus répandu dans l'industrie du GPL est celui qui permet un stockage économique de grandes quantités avec des coûts d'exploitation très faibles. Le GPL est stocké dans des réservoirs directement exposés à l'air ambiant. La pression de stockage et la tension de vapeur à température ambiante dépendent principalement de la nature du produit stocké et des conditions atmosphériques.

Parmi les types de stockage, on trouve :

Les réservoirs cylindriques :

Ces réservoirs peuvent être installés à l'horizontale ou à la verticale, avec une capacité limitée (allant jusqu'à 3000 m³). Ils sont particulièrement sensibles à la mise sous vide.



Figure I. 10: Exemple d'un réservoir cylindrique

Chapitre I : Présentation de complexe GP1/Z et Généralités sur le GPL

Les réservoirs sphériques :

Ce sont des réservoirs de forme sphérique qui permettent d'obtenir une meilleure résistance de la tôle, réduisant ainsi le coût d'investissement. Ils ont une capacité variable de 200 m³ à 7000 m³ et se caractérisent par un faible échange de chaleur avec l'air ambiant.



Figure I. 11: Exemple d'un réservoir sphérique

I.7.9 Stockage sous talus :

Il s'agit d'un mode de stockage souterrain pouvant être conçu sous une forme sphérique ou allongée (en forme de cigare). Les parois sont recouvertes de couches protectrices pour résister aux contraintes thermiques et mécaniques. Une épaisseur minimale d'un mètre de matériaux denses et inertes est utilisée. Pour des raisons de sécurité, toutes les canalisations et dérivations débouchent généralement dans la partie supérieure.

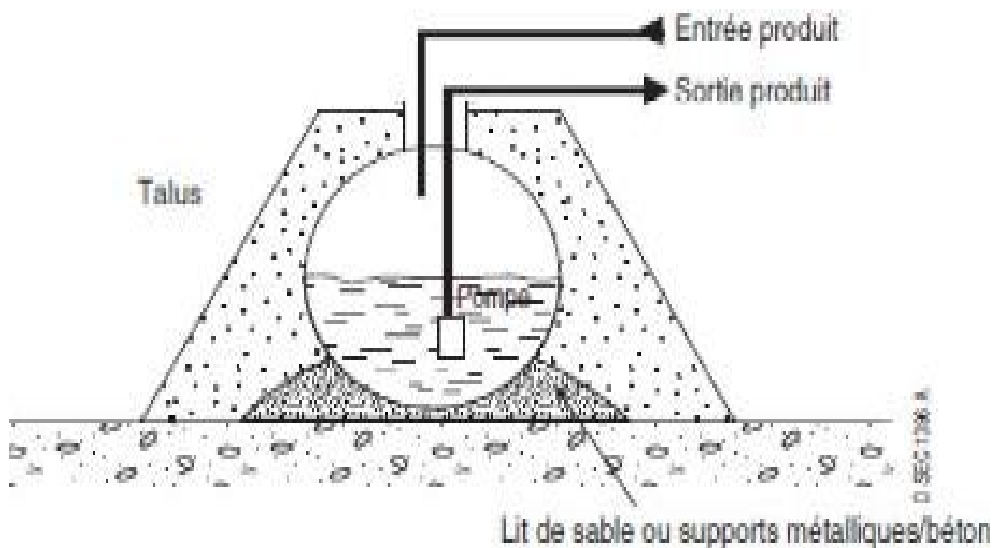


Figure I. 12: Exemple d'un réservoir sous talus

Chapitre I : Présentation de complexe GP1/Z et Généralités sur le GPL

I.7.10 Avantages et inconvénients de GPL

Avantages

- Le GPL est moins cher à la pompe que l'essence ou le diesel, permettant des économies significatives sur le coût du carburant.
- Il émet moins de CO₂, de particules fines et d'oxydes d'azote (NO_x), ce qui en fait une option plus respectueuse de l'environnement.
- Le GPL est accessible dans de nombreux pays grâce à un réseau de stations-service en expansion.
- Sa combustion plus propre réduit l'usure du moteur, prolongeant ainsi sa durée de vie.
- Dans certains pays, les véhicules GPL bénéficient d'avantages fiscaux, comme des réductions de taxes ou des exonérations de péages urbains.

Inconvénients :

- Les véhicules GPL ont souvent une autonomie plus faible en raison de la taille limitée du réservoir et d'une consommation plus élevée
- Bien qu'en développement, le réseau de stations GPL reste moins dense que celui des carburants traditionnels, ce qui peut compliquer le ravitaillement.
- L'installation d'un système GPL représente un investissement initial important, même si les économies de carburant peuvent le compenser à long terme.
- Certains véhicules GPL peuvent subir une légère baisse de performance par rapport à ceux fonctionnant à l'essence ou au diesel.
- Le réservoir GPL occupe une partie du coffre, réduisant l'espace disponible pour les bagages.
- Les véhicules GPL nécessitent un entretien régulier et spécialisé, ce qui peut augmenter les coûts de maintenance.

Chapitre II : Revue bibliographique

Chapitre II : Revue bibliographique

II.1 Études précédentes sur la conduction transitoire dans les parois de réservoirs

La conduction transitoire de la chaleur à travers les parois de réservoirs a fait l'objet de nombreuses recherches dans le domaine du transfert thermique, en particulier dans les applications industrielles telles que le stockage d'hydrocarbures, de gaz cryogéniques, ou de fluides chimiques sensibles à la température.

Plusieurs études ont abordé ce phénomène en considérant différentes géométries (parois cylindriques, sphériques ou planes) et divers matériaux constituant les parois, incluant les métaux, les isolants thermiques, ou les matériaux à changement de phase (PCM). L'objectif principal est souvent de prédire l'évolution temporelle du profil de température dans l'épaisseur de la paroi afin de garantir l'intégrité structurelle du réservoir et la stabilité thermique du fluide contenu.

Kemmoukh et al. (2020) proposent étude générale sur le GPL et les échangeurs de chaleur, en détaillant ses caractéristiques physico-chimiques et les procédés de production. Leur étude s'étend à une classification approfondie des différents types d'échangeurs de chaleur utilisés dans l'industrie, ainsi qu'à la présentation d'une méthode de dimensionnement de ces échangeurs. Cette contribution offre un cadre conceptuel essentiel pour appréhender les transferts thermiques dans les systèmes industriels, notamment dans les bacs de stockage où les échanges thermiques doivent être maîtrisés pour limiter les pertes énergétiques et les risques liés à la volatilisation du gaz.

Hamzaoui (2015) a mené une étude par simulation numérique avec le logiciel Fluent, focalisée sur l'influence du flux thermique rayonné sur la propagation de la température à l'intérieur du volume occupé par le gaz dans un bac de stockage extérieur. Cette approche dynamique permet d'évaluer l'impact du rayonnement thermique, souvent négligé, sur la température interne du réservoir au cours du temps, sous des conditions environnementales normales. Les résultats soulignent l'importance de prendre en compte ce mode de transfert pour une modélisation précise des phénomènes thermiques dans les bacs GPL.

Ait Ferhat (2004) a développé un modèle mathématique sophistiqué intégrant les conditions aux limites spécifiques à la convection externe et interne du liquide cryogénique. En couplant ces conditions à l'équation de la chaleur, il a pu simuler l'interaction thermique entre le GNL et son environnement. Ce modèle, implémenté dans un programme Fortran, permet de mieux

Chapitre II : Revue bibliographique

comprendre les échanges thermiques complexes au sein des réservoirs cryogéniques, en tenant compte des phénomènes convectifs qui influencent directement la stabilité thermique du stockage.

Hariti (2007) s'est intéressé à l'évaluation du taux d'évaporation du GNL dans une configuration réelle de réservoir de stockage. Son étude met en lumière l'influence déterminante de plusieurs paramètres, notamment le niveau de GNL dans le réservoir, la température ambiante et le flux solaire incident. Cette approche expérimentale fournit des données précieuses pour la gestion opérationnelle des réservoirs, en particulier pour anticiper les pertes par évaporation (boil-off) et optimiser les conditions de stockage.

Enfin, Mecerli et Guezoun (2023) ont réalisé une étude approfondie sur le phénomène de boil-off dans le conteneur cryogénique T0001 du complexe GP1Z – SONATRACH. Leur travail se distingue par une double approche : d'une part, une analyse théorique détaillée des processus de transfert thermique à travers les parois du bac, intégrant la conduction, la convection et le rayonnement ; d'autre part, une simulation numérique réalisée avec ANSYS 20.2, visant à modéliser l'évolution du flux thermique et des températures pour différents matériaux isolants tels que la perlite, le polyuréthane expansé (PUF) et le polystyrène expansé. Les résultats démontrent clairement l'impact crucial de la qualité de l'isolation thermique et des conditions ambiantes sur le taux d'évaporation du propane. Ils soulignent que l'optimisation de l'isolation permet non seulement de réduire les pertes énergétiques, mais aussi d'améliorer la sécurité et la stabilité du stockage.

Ces travaux convergent vers une meilleure compréhension des mécanismes thermiques dans les bacs GPL et GNL, en mettant en exergue l'importance de la modélisation rigoureuse des transferts thermiques (conduction, convection, rayonnement) et de la simulation numérique pour prédire les comportements thermiques sous diverses conditions. Ils insistent également sur le rôle fondamental de l'isolation thermique pour limiter le phénomène de boil-off, qui constitue un enjeu majeur pour la sécurité et la performance énergétique des installations.

Cette revue bibliographique illustre ainsi la complémentarité des approches théoriques, numériques et expérimentales dans l'étude de la conduction à travers les parois des réservoirs GPL/GNL, et ouvre des perspectives pour l'amélioration des techniques de stockage cryogénique et la maîtrise des pertes thermiques.

Chapitre II : Revue bibliographique

Carslaw et Jaeger (1959) ; pionniers dans le domaine ; ont fourni des solutions analytiques aux problèmes de conduction transitoire unidimensionnelle dans divers types de solides, en considérant des conditions initiales et aux limites variées.

Des méthodes numériques et analytiques (séries de Fourier, transformées de Laplace, etc.) pour résoudre les équations de conduction transitoire, applicables aux parois de réservoirs sous certaines hypothèses simplificatrices (homogénéité, isotropie, conditions initiales uniformes) ont été par Incropera et DeWitt dans leur manuel classique.

Des études récentes utilisant la méthode des éléments finis (MEF) ou la méthode des volumes finis (MVF) ont permis de traiter des géométries plus complexes et des matériaux hétérogènes. Ces travaux permettent une modélisation précise du transfert de chaleur transitoire, notamment en couplant la conduction avec des effets de convection naturelle à l'intérieur du réservoir.

D'autres travaux se sont intéressés à l'impact des couches isolantes (comme la perlite, les mousses polyuréthane, ou les multicouches à vide) sur la réduction des flux thermiques à travers les parois. Ces études montrent que le comportement transitoire est fortement influencé par la conductivité thermique effective et l'inertie thermique de l'isolant.

Enfin, des recherches appliquées sur des réservoirs cryogéniques ou soumis à des variations brusques de température ont mis en évidence la nécessité de prendre en compte les effets thermomécaniques et les contraintes induites par les gradients thermiques transitoires.

II.2 Concepts fondamentaux du transfert de chaleur : conduction, convection, rayonnement

La chaleur peut être transférée selon trois modes principaux : la conduction, la convection et le rayonnement. La conduction correspond au transfert d'énergie thermique à travers un matériau sans déplacement macroscopique de matière, résultant de l'agitation moléculaire et des collisions entre particules. Elle est prédominante dans les solides mais existe également dans les fluides au repos. La convection implique le transport de chaleur par le mouvement macroscopique d'un fluide, qu'il soit naturel (mouvement dû aux différences de densité liées aux gradients de température) ou forcé (mouvement induit mécaniquement). Le rayonnement thermique, quant à lui, est un transfert d'énergie par ondes électromagnétiques, qui peut se produire même dans le vide, et dépend de la température des corps émetteurs et récepteurs.

Chapitre II : Revue bibliographique

II.2.1. Introduction

Le Transfert d'énergie a lieu chaque fois qu'un gradient de température existe à l'intérieur d'un système, ou lorsque deux systèmes à températures différentes sont mis en contact. Le processus par lequel la transmission de l'énergie s'effectue est désigné par le terme transfert de chaleur.

II.2.2 Les trois modes de transfert de chaleur

Par conduction

Phénomène au moyen duquel la chaleur s'écoule dans un milieu (solide, liquide ou gaz) d'une région à haute température vers une autre à basse température, ou entre différents milieu mis en contact (contigus) sans qu'il y ait mouvement de ce milieu (milieu macroscopiquement au repos).

Elle résulte de la vibration des réseaux cristallins dans les solides (atomes et molécules) et de l'agitation moléculaire pour les liquides et les gaz. - Expression des flux d'énergie La théorie de la conduction repose sur l'hypothèse de Fourier : la densité de flux est proportionnelle au gradient de température :

$$\vec{\varphi} = -\lambda \overrightarrow{grad}(T)$$

Ou sous forme algébrique :

$$\varphi = -\lambda S \left(\frac{\partial T}{\partial x} \right)$$

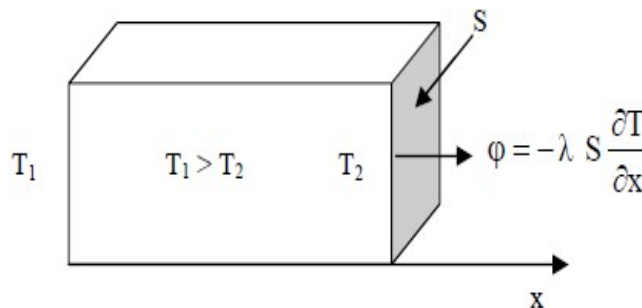


Figure II. 1: transfert de chaleur conductif

Transfert de chaleur par convection

La convection est un mode de transfert de chaleur qui met en jeu, en plus de la conduction, le mouvement macroscopique de la matière. Ce phénomène se produit au sein des milieux fluides en écoulement ou entre une paroi solide et un fluide en mouvement.

On distingue deux types de convection :

Chapitre II : Revue bibliographique

Convection naturelle :

Les mouvements sont dus aux variations de masse volumique dans un fluide soumis au champ de pesanteur. Les variations de masse volumique peuvent être générées par des gradients de température (l'air chaud est plus léger que l'air froid) et/ou par des gradients de composition.

Convection forcée :

Le mouvement du fluide est provoqué par des actions mécaniques extérieures (pompe, ventilateur...)

Expression des flux d'énergie

Fluide à T_{∞}

$$\varphi = h \cdot s(T_p - T_{\infty})$$

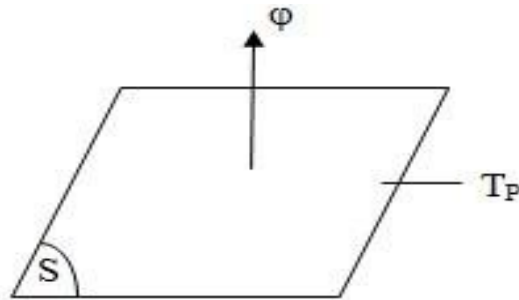


Figure II. 2: schéma de transfert de chaleur convectif

- φ : flux de chaleur par convection (en W).
- h : coefficient de transfert de chaleur par convection (en $W/m^2 \cdot K$).
- S : surface de contact entre le solide et le fluide (en m^2).
- T_p : température de la surface solide (en K ou $^{\circ}C$).
- T_{∞} : température du fluide loin de la surface solide (en K ou $^{\circ}C$).

Transfert de chaleur par rayonnement :

C'est le mécanisme par lequel la chaleur se transmet par rayonnement électromagnétique d'un corps à haute température vers un autre à basse température

Expression des flux d'énergie

Milieu environnant à T_{∞}

$$\varphi = \sigma \epsilon S(T_p^4 - T_{\infty}^4)$$

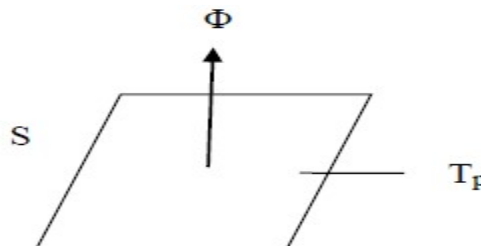


Figure II. 3: schéma de transfert de chaleur radiatif

φ : Flux de chaleur par rayonnement (en W).

Chapitre II : Revue bibliographique

- σ : constant de Stefan-Boltzmann
- ε : émission de la surface (sans dimension, entre 0 et 1).
- s : surface émettrice (en m^2).
- T_p : température de la surface solide (en K ou $^{\circ}C$).
- T_{∞} : température du fluide loin de la surface solide (en K ou $^{\circ}C$).

II.2.3 Etude de Transfert de chaleur par conduction en régime permanent

II.2.3.1 Transfert unidirectionnel

Mur simple

En effectuant un bilan thermique sur le système (S) constitué par la tranche de mur comprise entre les abscisses x et $x + dx$, il vient :

$$\varphi_x = \varphi_{x+dx} \Rightarrow -\lambda S \left(\frac{dT}{dx} \right)_x = -\lambda S \left(\frac{dT}{dx} \right)_{x+dx}$$

D'où

$$\frac{dT}{dx} = A \quad \text{Et} \quad T(x) = A x + B$$

Avec les conditions aux limites :

$$T(x=0) = T_1 \text{ et } T(x=e) = T_2$$

D'où :

$$T = T_1 - \frac{x e}{e} (T_1 - T_2)$$

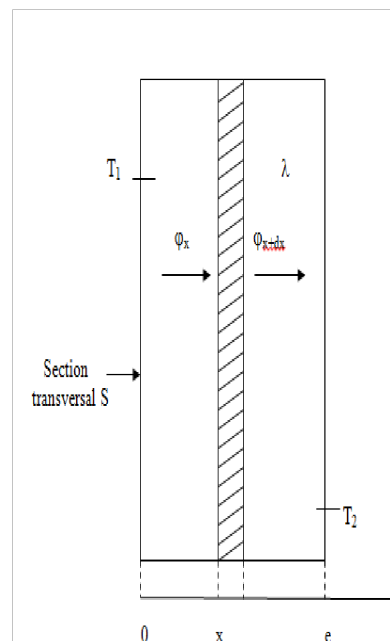


Figure II. 4: bilan thermique élémentaire sur un mur simple

Le profil de température est donc linéaire. La densité de flux de chaleur traversant le mur s'en déduit par la relation :

$$\Phi = -\lambda \frac{dT}{dx} \quad , \text{ D'où :}$$

$$\Phi = \frac{\lambda(T_1 - T_2)}{e}$$

La relation (1) peut également se mettre sous forme :

$$\Phi = \frac{T_1 - T_2}{\frac{e}{\lambda S}}$$

Chapitre II : Revue bibliographique

Mur multicouches

En régime permanent, le flux de chaleur se conserve lors de la traversée du mur et s'écrit :

$$\varphi = h_1 S (T_{f1} - T_2) = \frac{\lambda_A S (T_1 - T_2)}{e_A} = \frac{\lambda_B S (T_2 - T_3)}{e_B} = \frac{\lambda_C S (T_3 - T_4)}{e_C} = h_2 S (T_4 - T_{f2})$$

$$\varphi = \frac{T_{f1} - T_{f2}}{\frac{1}{h_1 S} + \frac{e_A}{\lambda_A S} + \frac{e_B}{\lambda_B S} + \frac{e_C}{\lambda_C S} + \frac{1}{h_2 S}}$$

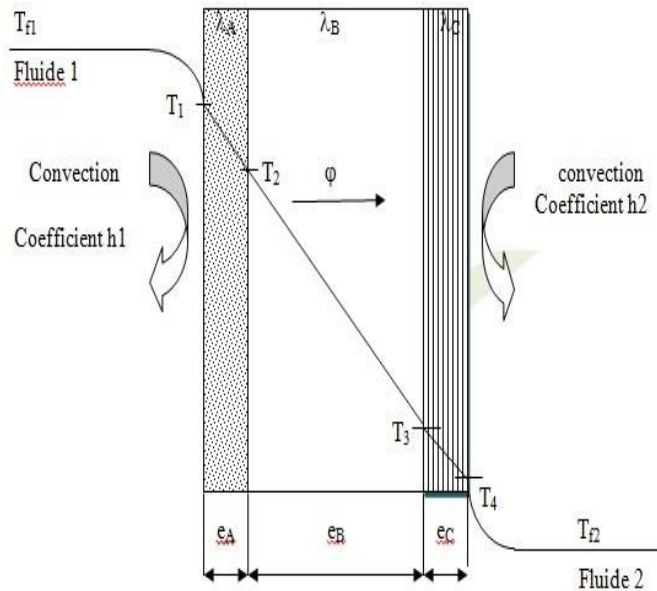


Figure II. 5: Schéma de flux et température dans un mur multicouches

Cylindre creux long (tube)

Effectuons le bilan thermique du système constitué par la partie de cylindre comprise entre les rayons r et $r + dr$:

$$\varphi_r = \varphi_{r+dr}, \text{ avec : } \varphi = -\lambda 2\pi L \left(\frac{dT}{dr} \right)_r$$

$$\text{Et } \varphi_{r+dr} = -\lambda 2\pi (r + dr) L \left(\frac{dT}{dr} \right)_{r+dr} ; \text{ soit}$$

$$-\lambda 2\pi L \left(\frac{dT}{dr} \right)_r = -\lambda 2\pi (r + dr) L \left(\frac{dT}{dr} \right)_{r+dr}$$

$$\text{D'où } r \left(\frac{dT}{dr} \right)_r = C$$

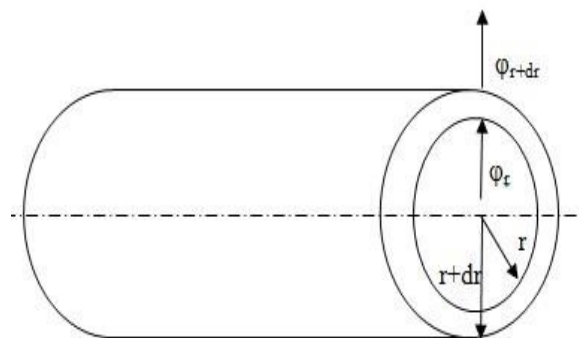


Figure II. 6: Schéma du transfert de chaleur dans un cylindre creux

Chapitre II : Revue bibliographique

Avec les conditions aux limites : $T(r_1) = T_1$ et $T(r_2) = T_2$ D'où :

$$\frac{T(r) - T_1}{T_2 - T_1} = \frac{\ln\left(\frac{r}{r_1}\right)}{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)}$$

Et par application de la relation $\varphi = -\lambda 2\pi r L \left(\frac{dT}{dr}\right)$ On obtient : $\varphi = \frac{2\pi\lambda L(T_1 - T_2)}{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)}$

Cylindre creux multicouche

En régime permanent, le flux de chaleur ϕ se conserve lors de la traversée des différentes couches et s'écrit :

$$\varphi = h_1 2\pi r_1 L (T_{f1} - T_1) = \frac{2\pi\lambda_A L (T_1 - T_2)}{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)} = \frac{2\pi\lambda_B L (T_2 - T_{f2})}{\ln\left(\frac{r_3}{r_2}\right)} = h_2 2\pi r_3 L (T_3 - T_{f2})$$

D'où

$$\varphi = \frac{T_{f1} - T_{f2}}{\frac{1}{h_1 2\pi r_1 L} + \frac{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)}{2\pi\lambda_A L} + \frac{\ln\left(\frac{r_3}{r_2}\right)}{2\pi\lambda_B L} + \frac{1}{h_2 2\pi r_3 L}}$$

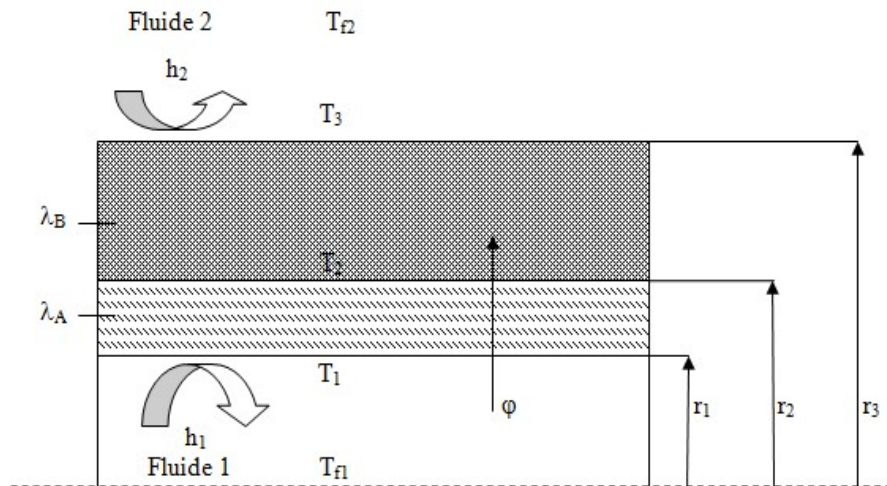


Figure II. 7 : Schéma de transfert de la chaleur dans un cylindre creux multicouche

Chapitre II : Revue bibliographique

II.3 Théorie de la conduction thermique instationnaire (équation de la chaleur, conditions initiales et aux limites)

La conduction thermique instationnaire :

La conduction thermique instationnaire, également appelée conduction transitoire, correspond à un régime de transfert thermique dans lequel la température au sein d'un matériau varie à la fois dans l'espace et dans le temps. Ce phénomène intervient lorsqu'un corps initialement à température uniforme ou variable est soumis à un changement soudain ou progressif des conditions thermiques sur ses surfaces (chauffage, refroidissement, contact avec un fluide, rayonnement, etc.).

II.3.1. Équation fondamentale de la conduction transitoire

Le comportement thermique d'un milieu en régime transitoire est régi par l'équation de la chaleur (ou équation de diffusion thermique), qui s'exprime, en trois dimensions, sous la forme générale :

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot (\lambda \nabla T) + \dot{q}_v$$

Où

- $T(x, y, z, t)$ est la température en (K),
- ρ Est la masse volumique en (kg/m^3),
- c_p : est la capacité thermique massique à pression constante en ($\text{J}/\text{kg} \cdot \text{K}$),
- λ : est la conductivité thermique en ($\text{W}/\text{m} \cdot \text{K}$),
- $\dot{q}_v$: est une source volumique de chaleur en (W/m^3)
- $\nabla \cdot (\lambda \nabla T)$: est le terme de diffusion thermique spatiale.

Dans le cas d'un matériau homogène et isotrope sans source interne, l'équation se simplifie :

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \nabla^2 T$$

Avec

$\alpha = \frac{\lambda}{\rho C_p}$ La diffusivité thermique (m^2/s), paramètre clé caractérisant la vitesse à laquelle un matériau réagit aux variations thermiques.

Chapitre II : Revue bibliographique

II.3.2. Conditions nécessaires à la résolution

La résolution analytique ou numérique de cette équation requiert :

Une condition initiale :

$$T(x, y, z, t = 0) = T_0(x, y, z)$$

Qui définit la répartition de la température dans le corps au moment initial.

Des conditions aux limites, qui peuvent être :

Dirichlet : température imposée sur la frontière

$$T = T_s,$$

Neumann : flux thermique imposé

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial n} = q_s,$$

Robin (ou convective) : échange avec un fluide par convection

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial n} = h(T - T_\infty)$$

II.4 Présentation des méthodes de simulation numérique appliquées à la conduction instationnaire

II.4.1. Méthodes numériques utilisés

Plusieurs méthodes numériques permettent d'approcher la solution de cette équation :

a. Méthode des différences finies (MDF)

Approche simple basée sur un maillage cartésien.

Approximations des dérivées par des différences.

Facile à mettre en œuvre, mais peu flexible avec des géométries complexes.

b. Méthode des éléments finis (MEF)

Très utilisée dans les logiciels industriels. Approche par discrétisation spatiale en éléments (triangles, quadrilatères...). Adaptée à des géométries irrégulières et à des matériaux hétérogènes. Exemples : ANSYS, COMSOL.

Chapitre II : Revue bibliographique

c. Méthode des volumes finis (MVF)

Populaire en mécanique des fluides.

Repose sur la conservation de l'énergie dans chaque volume de contrôle.

Utilisée dans des codes comme Fluent ou Open FOAM.

d. Méthodes de discrétisation temporelle

Méthodes explicites : chaque pas de temps dépend uniquement des données du pas précédent.

Rapide mais conditionnellement stable.

Méthodes implicites : plus stables, permettent de grands pas de temps, mais nécessitent la résolution de systèmes linéaires à chaque pas.

II.4.2. Avantages des simulations numériques

Modélisation précise de situations complexes (géométries réelles, propriétés thermiques variables, conditions limites multiples).

Optimisation : test de plusieurs scénarios sans essais physiques coûteux.

Visualisation des profils de température, flux thermiques, etc.

Analyse transitoire réaliste : permet de suivre l'évolution thermique au fil du temps.

II.4.3. Logiciels courants utilisés

Tableau II. 1 utilisation de logiciel

Logiciel	Méthode principale	Particularités
ANSYS	MEF	Interface graphique avancée, couplage multiphysique
COMSOL	MEF	Simulation multiphysique, très interactif
OpenFOAM	MVF	Open source, très flexible mais technique
Fluent	MVF	Spécialisé en CFD, inclut conduction
MATLAB	MDF/MEF/MVF	Très personnalisable pour des modèles sur-mesure

II.4.4. Application pour la paroi du réservoir

Par exemple, pour une paroi de réservoir cryogénique, une simulation transitoire permet :

- De prévoir l'évolution temporelle de la température à travers la paroi,
- De déterminer le délai avant stabilisation thermique,
- D'optimiser l'épaisseur des matériaux isolants,
- De minimiser les risques de rupture ou de condensation en surface.

Chapitre II : Revue bibliographique

II.5. Présentation des méthodes de simulation numérique appliquées à la conduction instationnaire.

Les méthodes numériques telles que les différences finies, les éléments finis et les volumes finis sont couramment utilisées pour résoudre l'équation de la chaleur en régime transitoire, notamment lorsque la géométrie ou les conditions aux limites sont complexes. ANSYS, basé sur la méthode des éléments finis, est un outil puissant permettant de modéliser la conduction thermique instationnaire avec précision. Il offre la possibilité de définir des propriétés matériaux variables, des conditions aux limites complexes, et de simuler l'évolution temporelle de la température dans des structures réelles. ANSYS est largement utilisé dans l'industrie pour optimiser la conception thermique et assurer la sécurité des équipements .

Les méthodes numériques constituent un ensemble d'approches mathématiques et algorithmiques permettant de résoudre des problèmes complexes qui ne peuvent pas être traités analytiquement de manière directe. Dans le cadre de la simulation thermique transitoire, elles sont essentielles pour modéliser la conduction instationnaire avec précision.

II.5.1. Méthode des différences finies (MDF)

La méthode des différences finies consiste à discrétiser les dérivées spatiales et temporelles de l'équation de conduction en remplaçant les dérivées par des différences entre valeurs aux points discrets d'un maillage. Cette méthode est simple à mettre en œuvre et particulièrement efficace pour des géométries régulières et des problèmes unidimensionnels ou bidimensionnels simples. Les schémas explicites ou implicites sont utilisés pour la résolution temporelle, avec des compromis entre stabilité et coût de calcul.

II.5.2. Méthode des éléments finis (MEF)

La méthode des éléments finis est largement utilisée dans les logiciels de simulation comme ANSYS. Elle divise la géométrie en petits éléments finis, sur lesquels les équations différentielles sont approchées par des fonctions de forme. La MEF permet de gérer des géométries complexes et des conditions aux limites variées avec une grande flexibilité. Elle résout le problème sous forme d'un système algébrique global, souvent avec une méthode implicite adaptée aux simulations transitoires pour garantir la stabilité numérique .

II.5.3. Méthode des volumes finis (MVF)

La méthode des volumes finis repose sur la conservation des flux thermiques à l'échelle des volumes discrets. Elle transforme l'équation différentielle en bilans thermiques locaux sur

Chapitre II : Revue bibliographique

chaque volume, ce qui garantit la conservation locale de l'énergie. Cette technique est très utilisée en mécanique des fluides et en transfert thermique, notamment pour les problèmes couplés convection-conduction.

II.5.4. Méthodes temporelles

Pour la résolution dans le temps, les méthodes classiques incluent :

Schéma explicite : calcul de la température à l'instant suivant uniquement à partir des données à l'instant courant. Simple mais avec des contraintes fortes sur le pas de temps pour assurer la stabilité.

Schéma implicite : implique la résolution d'un système d'équations à chaque pas de temps, plus coûteux mais stable pour des pas de temps plus grands.

Méthodes semi-implicites ou Crank-Nicolson : combinent précision et stabilité en moyennant entre explicite et implicite.

Chapitre III : Simulation Numérique

Chapitre III : Simulation Numérique

III.1. Introduction

Ce chapitre se focalise sur l'exposition de la démarche numérique empruntée dans le contexte de cette étude. Le but principal consiste à modéliser le comportement thermique transitoire à travers la paroi d'un réservoir de stockage dans diverses conditions de convection, en utilisant l'outil de simulation ANSYS 20.2.

L'utilisation de cet outil offre une modélisation précise du transfert de chaleur non-stationnaire, particulièrement dans un environnement industriel délicat comme le stockage de GPL.

La simulation est structurée en deux phases principales :

Étape 1 : Faible coefficient de convection ($h = 10 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$).

Le but de cette première série de simulations est d'examiner le comportement thermique du mur du récipient dans un contexte où les transferts convectifs avec l'extérieur sont restreints. Trois scénarios ont été étudiés, chacun présentant une température extérieure distincte (20 °C, 25 °C et 30 °C), sur une période de 9 heures. Cette configuration offre la possibilité de suivre la progression de la température interne du système en réponse à des sollicitations thermiques modérées.

Etape 2 : Un coefficient de convection élevé est utilisé ($h = 90 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$).

La deuxième phase suit strictement les mêmes conditions de température et de durée que la première, mais avec un coefficient de convection nettement plus haut. Cela offre l'opportunité d'analyser l'impact de la force des transferts thermiques avec l'environnement sur la dynamique de la transmission thermique à travers la paroi du récipient.

III.2. Description du bac de stockage de GPL

La caractéristique principale de l'industrie de la liquéfaction des GPL est la mise en œuvre d'un tonnage très important sous forme liquide dans des conditions de pression et de température bien définies, d'où l'obligation d'avoir une grande capacité de stockage. Le complexe GP1Z dispose d'un bac de stockage de propane commercial T0001 d'une capacité de 70 000 m³.



Figure III. 1: Vue générale de bac de stockage de propane T0001

III. 3. Paramètres de fonctionnement de bac de stockage

La pression :

La pression de service de bac est résumée comme suite :

Tableau III. 1: Pression de service du bac T0001

Pression (mmH ₂ O)	Action
-50	Ouverture vannes casse vide
50	Injection de gaz naturel
100	Déclenchement de tous les compresseurs
300-800	Fonctionnement normal
950	Excès de gaz envoyé vers la torche BP
1000	Ouverture des soupapes de sécurité

Chapitre III : Simulation Numérique

La température :

La température de propane stocké dans le bac ne dépend que de sa composition. Alors que le bac fonctionne à pression atmosphérique, la température moyenne du produit stocké correspond à son point d'ébullition atmosphérique.

Tableau III. 2: Débit et température d'entrée et de sortie du bac T0001

Pression de service mmH ₂ O	50	100	300	800	950	1000
Température de service °C	-44.4	-44.3	-44.1	-42.9	-42.4	-42.3

Niveau :

Le niveau maximal que le propane peut atteindre dans le bac T0001 est de 27,5 m et le niveau minimal est de 2,5 m. Ce niveau est mesuré par un système ENRAF redondant.

Débit et température à l'entrée et à la sortie du bac :

Tableau III. 3: Débit et température d'entrée et de sortie du bac T0001

	Débit	Température
Entrée	Max 245(m ³ /hr)	Min -44°C
Sortie	5000(m ³ /hr)	-44°C

Propriétés de produit :

Le produit commercial stocké (propane) a les caractéristiques suivantes :

Chapitre III : Simulation Numérique

Tableau III. 4: Caractéristique du produit stocké

Composants	Spécifications
Ethane	Inférieur ou égal à 2% en mole
Propane	Supérieur à 97% en mole
Isobutane	Inférieur à 1%
Butane normale	
Teneur en eau	Spécification NGPA

III.4. Structure du bac T0001 :

La structure du bac T0001 se compose de différentes couches avec différents isolants comme la figure ci-dessous montre :

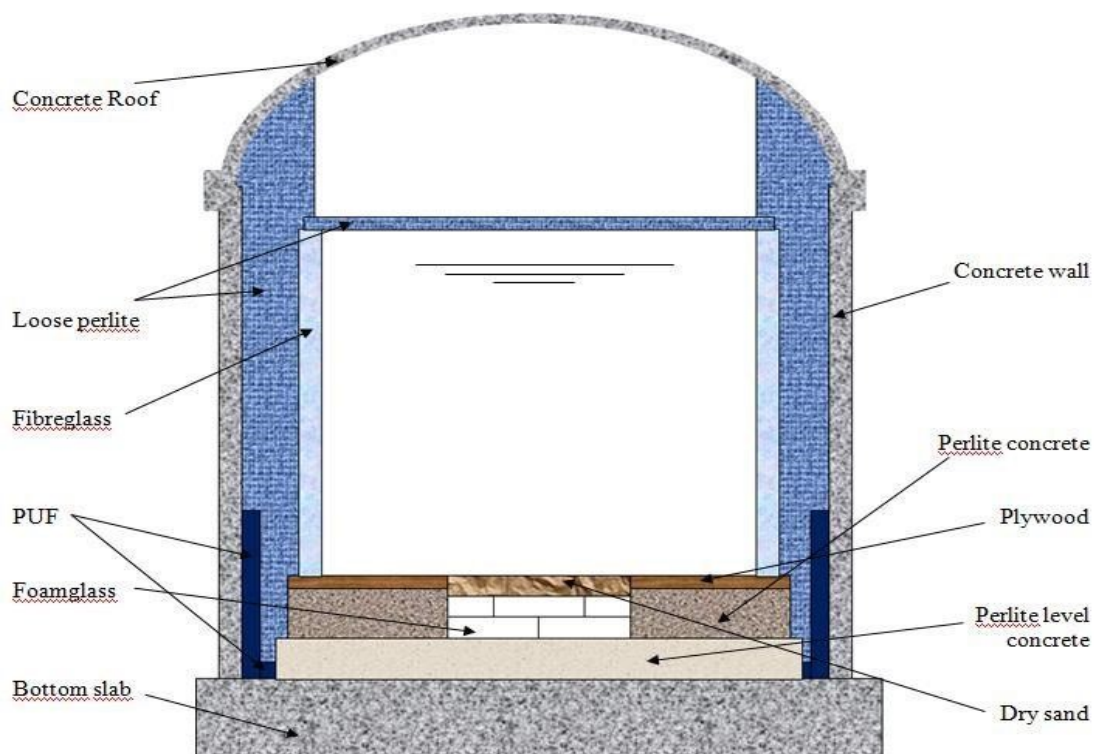


Figure III. 2: Schéma de bac T0001

Chapitre III : Simulation Numérique

Tableau III. 5 : La conductivité thermique des matériaux de bac T0001

Surface	Matériaux de construction	Conductivité thermique (Kcal/m.h.°C)	Epaisseur (m)
Fond	Foamglass (HLB 800)	0.041	0.25
	Perlite Concrete	0.350	0.284
	PUF	0.024	0.1
	Perlite Level Concrete	0.250	0.150
	Dry Sand	0.652	0.055
	Plywood	0.300	0.021
	Concrete Bottom	2.300	0.9
Paroi latérale	PUF	0.028 (journée)	0.1
	PUF	0.024 (nuit)	0.1
	Fiberglass (16 kg/m ³)	0.042 (journée)	0.12
	Fiberglass (16 kg/m ³)	0.042 (nuit)	0.12
	Loose Perlite	0.045 (journée)	
	Loose Perlite	0.042 (nuit)	
	Concrete Wall	2.300	1.2
Toit	Loose Perlite	0.041 (journée)	0.35
	Loose Perlite	0.040 (nuit)	0.35
	Concrete Roof	2.300	

Chapitre III : Simulation Numérique

III. 3. Modèle utilisé par le logiciel :

ANSYS 20.2 utilise généralement la méthode des éléments finis pour résoudre les problèmes de thermique transitoire, y compris le calcul des flux de chaleur. Dans ce contexte, l'équation de la chaleur est discrétisée et résolue numériquement sur un maillage.

L'équation de la chaleur dans le domaine du temps et de l'espace s'exprime comme suit :

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} + \nabla \cdot (\lambda \nabla T) + Q = \rho C_p \left(\frac{\partial T}{\partial t} \right) + \lambda \nabla^2 T + Q = 0$$

- λ : est la conductivité thermique
- Q : est la source interne de chaleur
- t : est le temps
- C_p : C'est la capacité thermique massique
- ρ est la densité du matériau,
- T est la température,
- ∇ est l'opérateur nabla représentant le gradient spatial.

On résout cette équation pour déterminer la répartition de la température T dans la zone d'intérêt, en tenant compte des conditions initiales, des conditions aux limites et des caractéristiques thermiques du matériau.

Dans ANSYS, on procède à la discrétisation de cette équation en recourant à la méthode des éléments finis. Le champ d'étude est divisé en éléments discrets, et une fonction d'interpolation est employée pour donner une approximation de la solution au sein de chaque élément. Les valeurs de température aux nœuds des éléments finis constituent les paramètres inconnus. À partir des caractéristiques du matériau, des conditions limites et initiales, on établit un ensemble d'équations algébriques qui sera ensuite traité numériquement pour déterminer les températures à divers points du maillage.

Dès que la distribution de température est déterminée, il est possible de calculer les flux thermiques en utilisant la loi de Fourier :

$$q = -k \nabla T$$

Où q représente le flux de chaleur et k est la conductivité thermique. Cette équation permet de calculer les flux de chaleur à travers les interfaces ou les surfaces d'intérêt du modèle.

Chapitre III : Simulation Numérique

III.4. Condition aux limites

Les conditions aux limites thermiques appliquées aux extrémités de la paroi sont les suivantes :

Condition de Robin (égalité du flux conductif avec le flux convectif)

- Un flux convectif du côté intérieur de la paroi avec un coefficient de convection $h=15$ W/m² et une température égale à -42°C .

1er cas

- Un flux convectif du côté extérieur de la paroi avec un coefficient de convection $h=10$ W/m² et une température égale à (20°C , 25°C et 30°C).

2^{ème} cas

- Un flux convectif du côté extérieur de la paroi avec un coefficient de convection $h=90$ W/m² et une température égale à (20°C , 25°C et 30°C).

III.5. Description de la géométrie

La figure III.2 décrit la paroi latérale du bac en 2D utilisée dans la présente simulation avec les dimensions, d'une hauteur de 1 m et une largeur de 1.02m.

La paroi est composée de quatre couches d'isolation thermique sont utilisées à savoir : Acier au Carbone : utilisé comme paroi structurelle interne. Polyuréthane expansé (PUF) : matériau isolant à faible conductivité thermique, Perlite expansée : matériaux poreux avec de bonnes performances thermiques, Laine de verre : isolant thermique très répandu pour ses bonnes performances et son faible cout.

Les caractéristiques de ces matériaux sont regroupées dans le tableau ci-dessous :

Tableau III. 6: Propriétés des matériaux utilisés

Matériaux	Masse volumique (kg/m ³)	Conductivité thermique λ (w/m. K)	Epaisseur (m)	Chaleur spécifique Cp (j/kg. K)
Acier	7850	45-60	0.595	470
Perlite	30-150	0,040-0.060	0.78	1000
PUF	30-40	0.020-0.030	0.1	1400
Laine de verre	10-100	0.030-0.045	0.12	8000

Chapitre III : Simulation Numérique

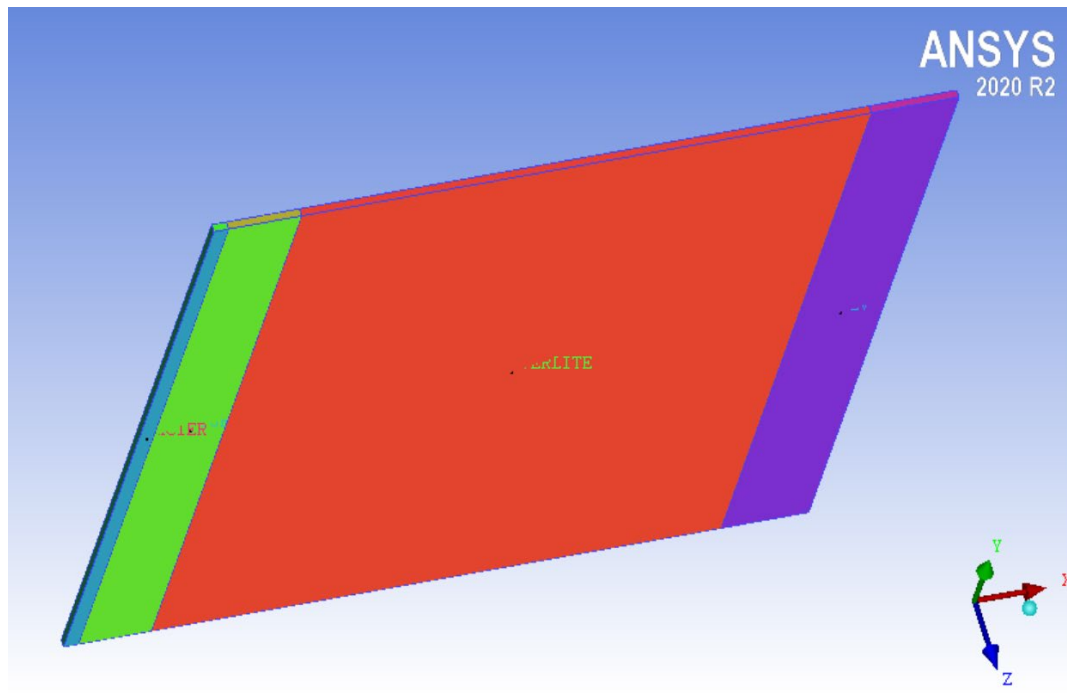


Figure III. 3: Description de la géométrie utilisée dans la simulation

Le maillage:

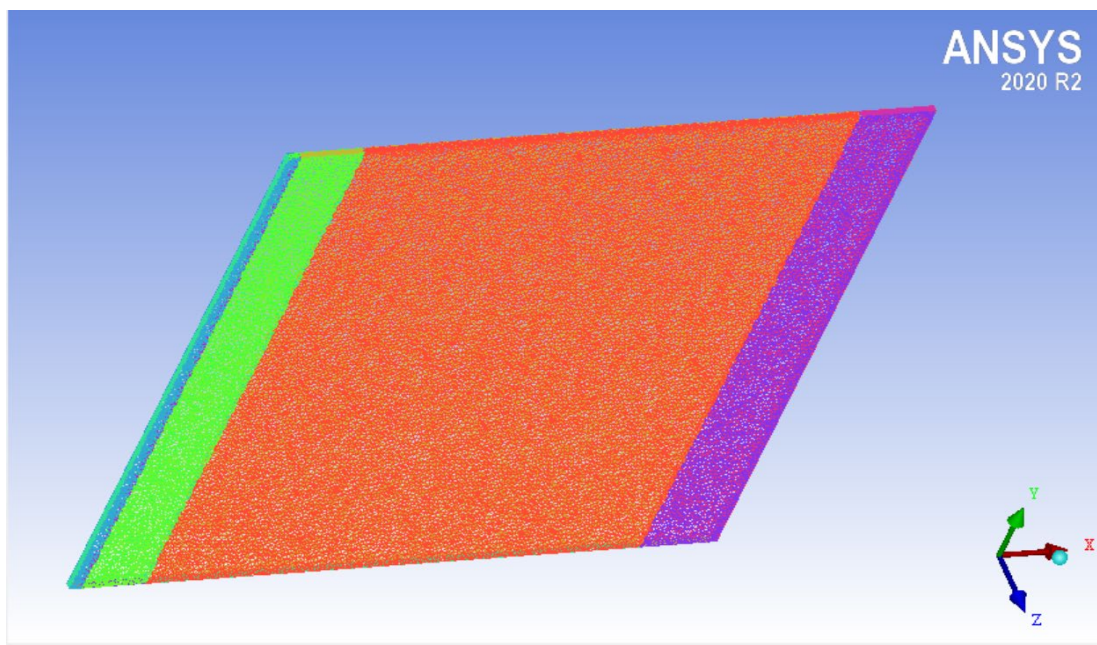


Figure III. 4: Vue rapprochée du maillage de la paroi

Chapitre IV : Résultats et discussions :

Chapitre IV : Résultats et discussions :

IV.1. Evolution de profil des températures en fonction de l'épaisseur à $h=10$

Les figures suivantes montrent l'évolution des profils de température dans la paroi d'un bac de stockage de GPL différentes températures ambiantes ($T = 20^{\circ}\text{C}$, 25°C et 30°C) au cours du temps (3h, 6h, 9h) avec un coefficient de convection.

Evolution de profil des températures à $T=20^{\circ}\text{C}$

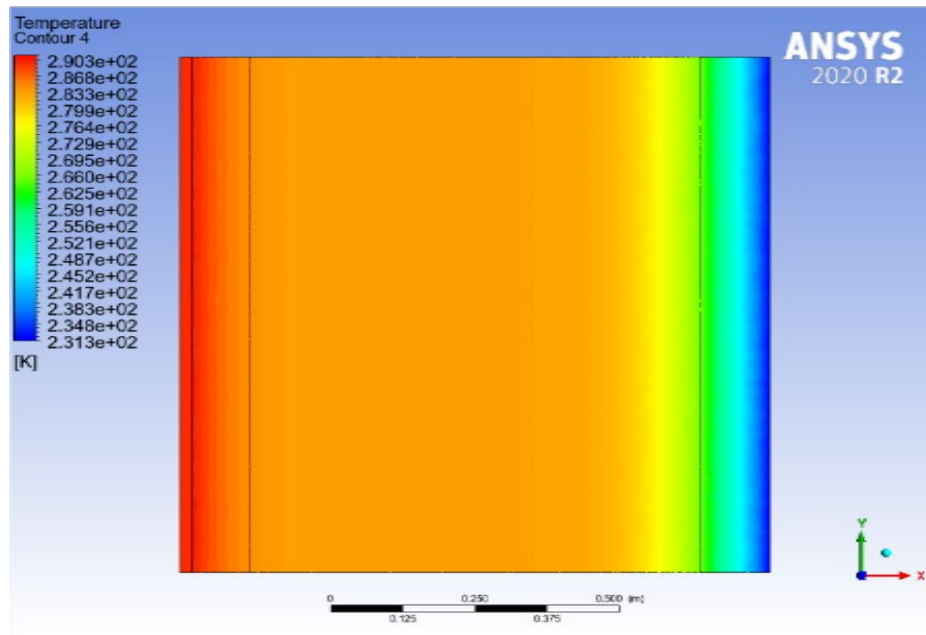


Fig. $t=3\text{h}$

Fig. $t = 3\text{h}$: On observe le début du transfert thermique depuis la gauche (zone en rouge représentant la surface chaude) vers la droite (zone bleue), avec un gradient thermique bien défini.

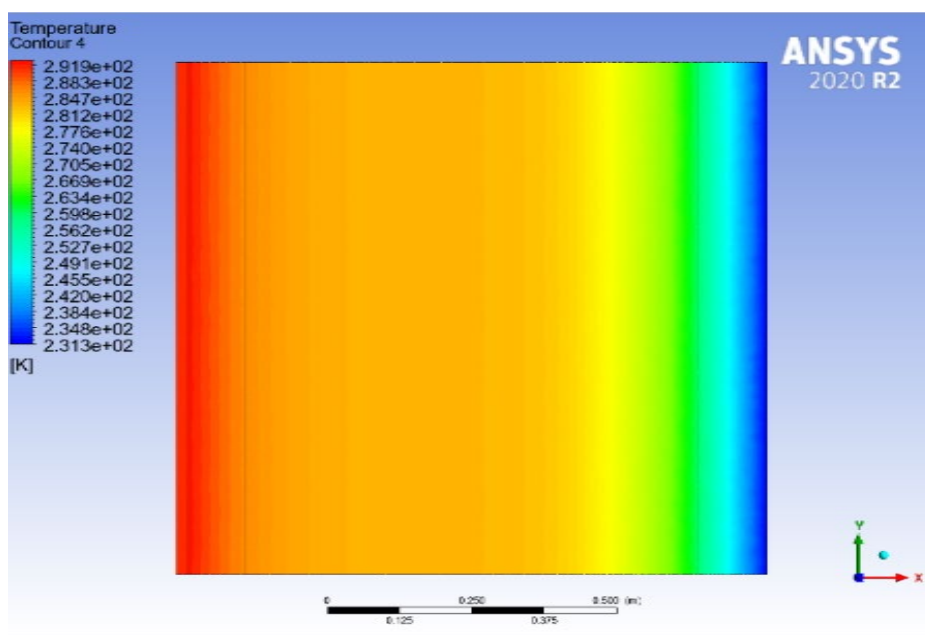


Fig. $t=6\text{h}$

Chapitre IV : Résultats et discussions :

Fig. t = 6h :Le gradient de température devient plus large ; la chaleur pénètre plus profondément dans le matériau. Les zones orange et jaune se sont étendues davantage vers l'intérieur.

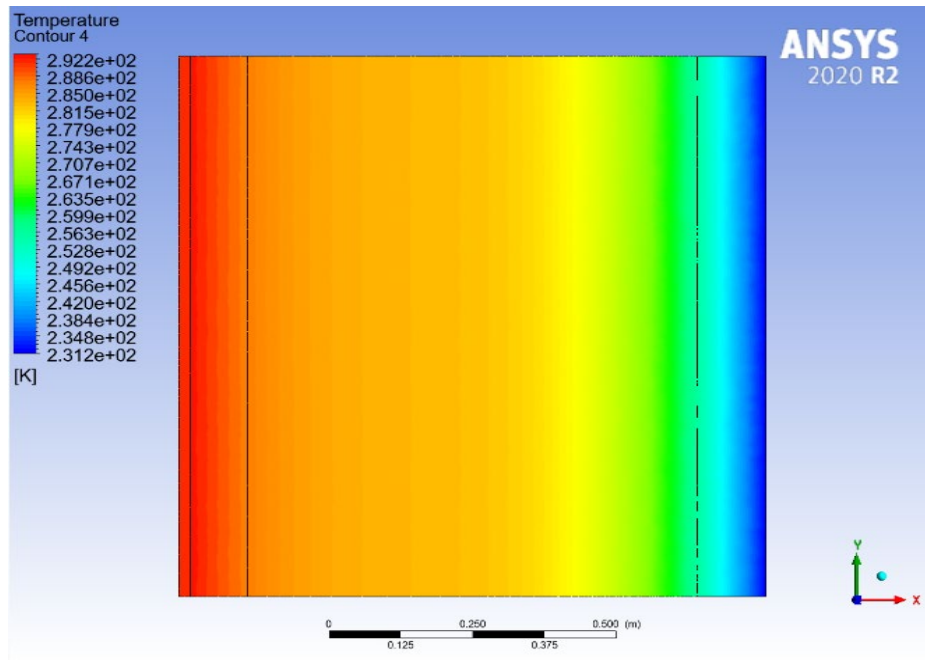


Fig. t=9h

Fig. t = 9h :Le transfert thermique s'est accentué. Le mur devient plus chaud à l'intérieur par rapport au début, bien que le différentiel thermique entre les deux faces soit encore important.

Evolution de profil des températures à T=25°C

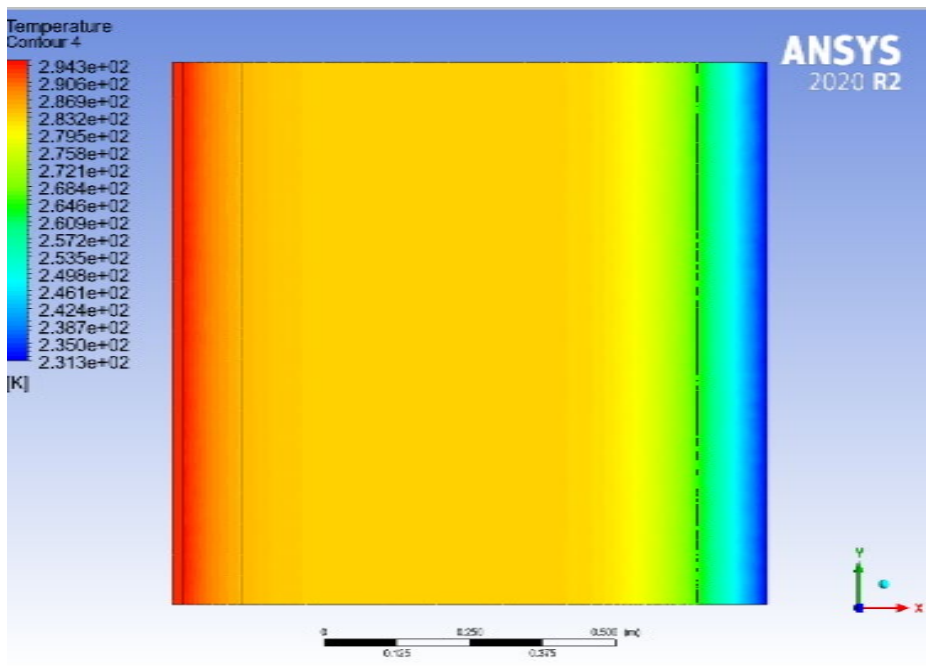


Fig. t=3h

Chapitre IV : Résultats et discussions :

Fig. $t = 3h$: On constate un échauffement plus important de la surface externe, avec des températures plus élevées que dans le cas précédent au même instant.

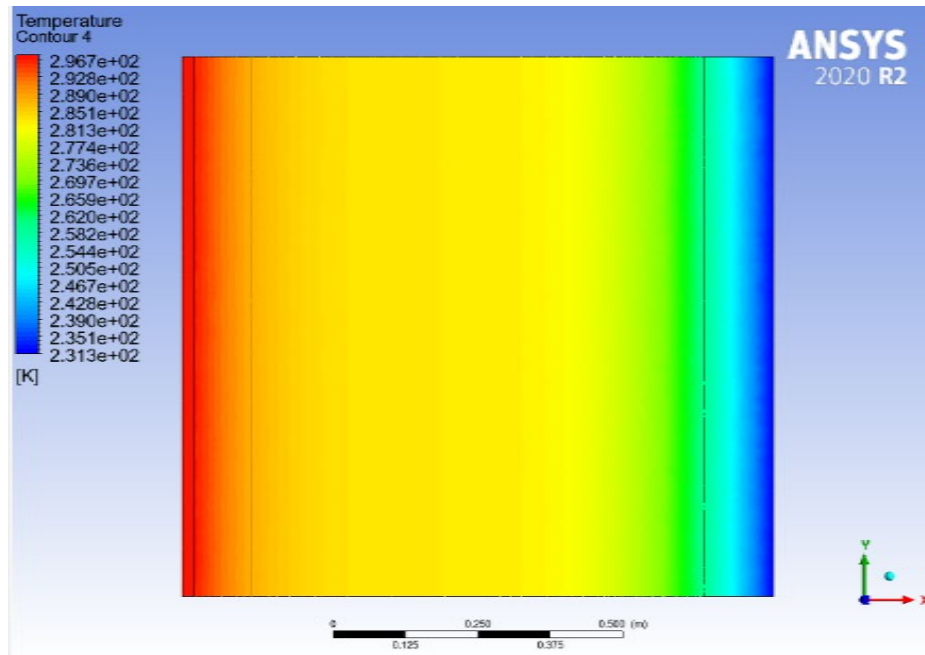


Fig. $t=6h$

Fig. $t = 6h$: Le profil thermique est plus homogène, avec une diminution des différences de température, en raison de la température extérieure plus élevée.

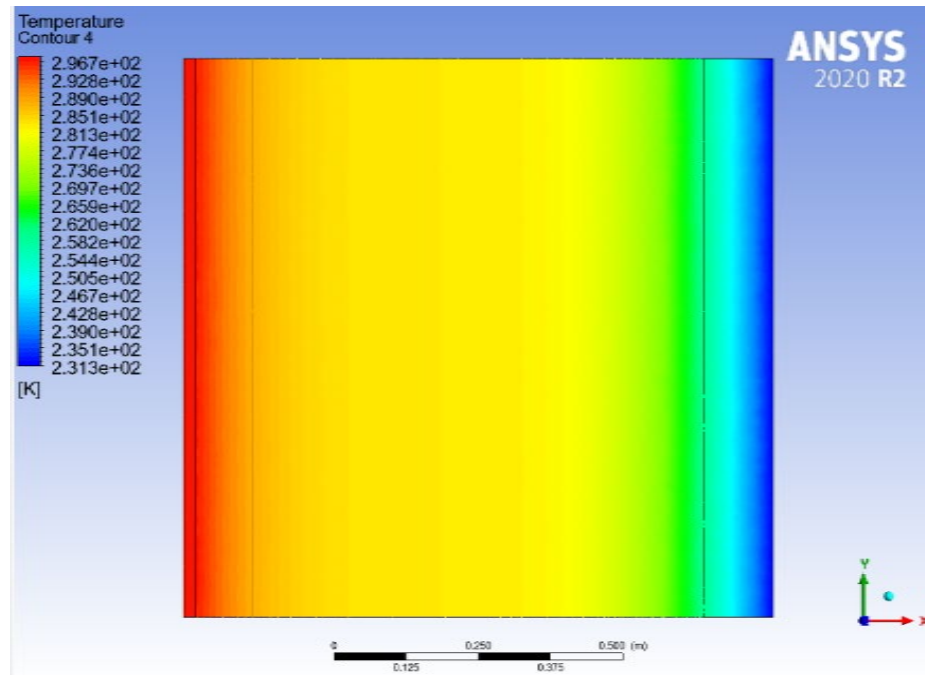


Fig. $t=9h$

Chapitre IV : Résultats et discussions :

À $t = 9\text{h}$ et $T = 25^\circ\text{C}$, la chaleur a pénétré plus profondément dans le mur, avec une répartition thermique plus homogène, indiquant un affaiblissement progressif de l'isolation thermique.

Evolution de profil des températures à $T=30^\circ\text{C}$

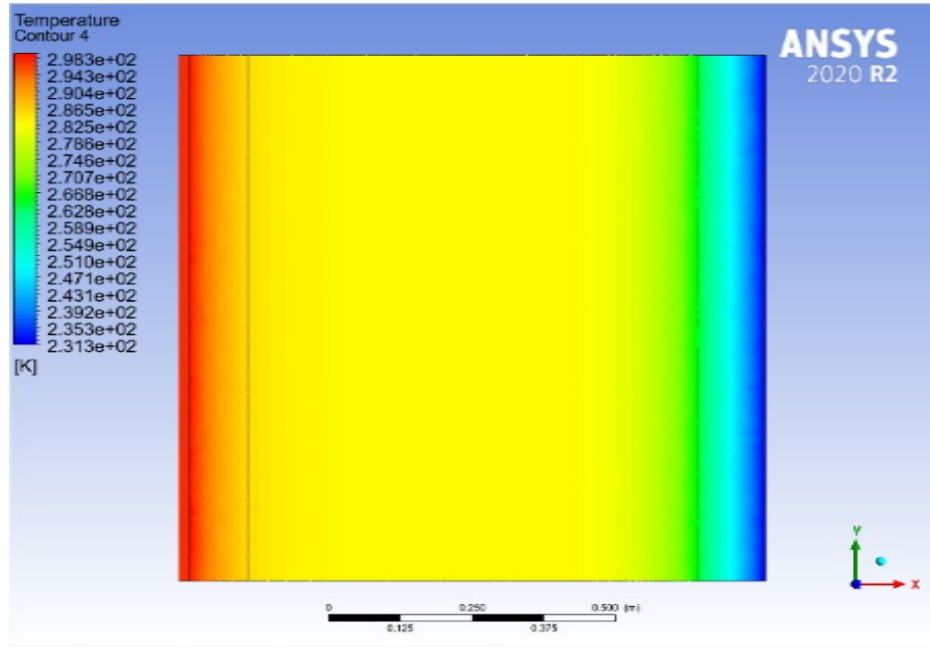


Fig. $t=3\text{h}$

À 3 heures, en comparaison à une température ambiante de 20°C , la température de la surface du mur est plus élevée et l'infiltration thermique plus marquée, mettant en évidence un gradient de température supérieur indiquant un transfert d'énergie thermique accru.

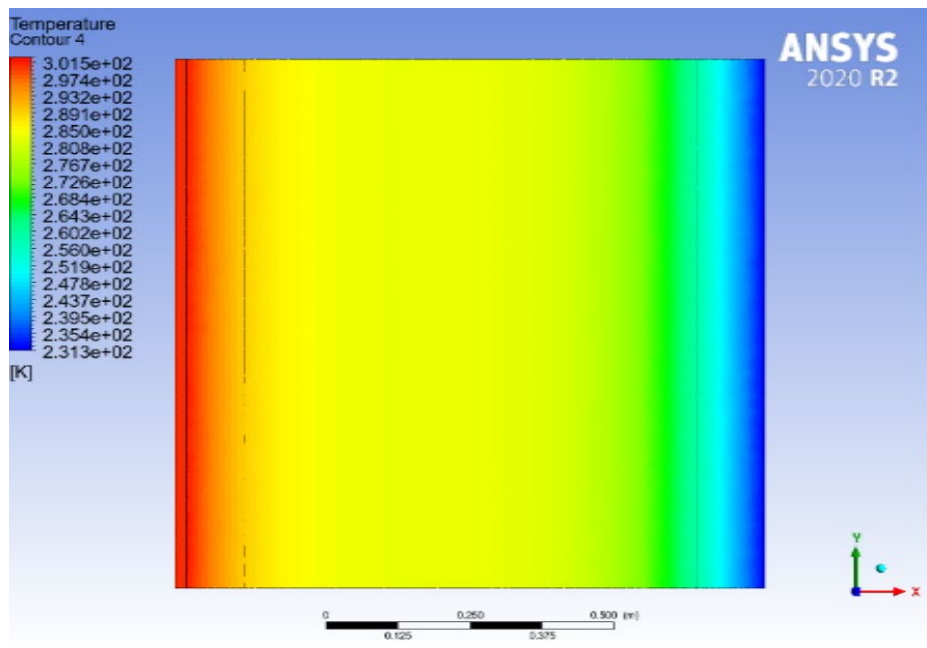


Fig. $t=6\text{h}$

Chapitre IV : Résultats et discussions :

À six heures, la montée de la température se propage davantage dans la paroi, la région centrale présentant une température plus uniforme qu'à 20°C, signe d'une conduction thermique plus accélérée.

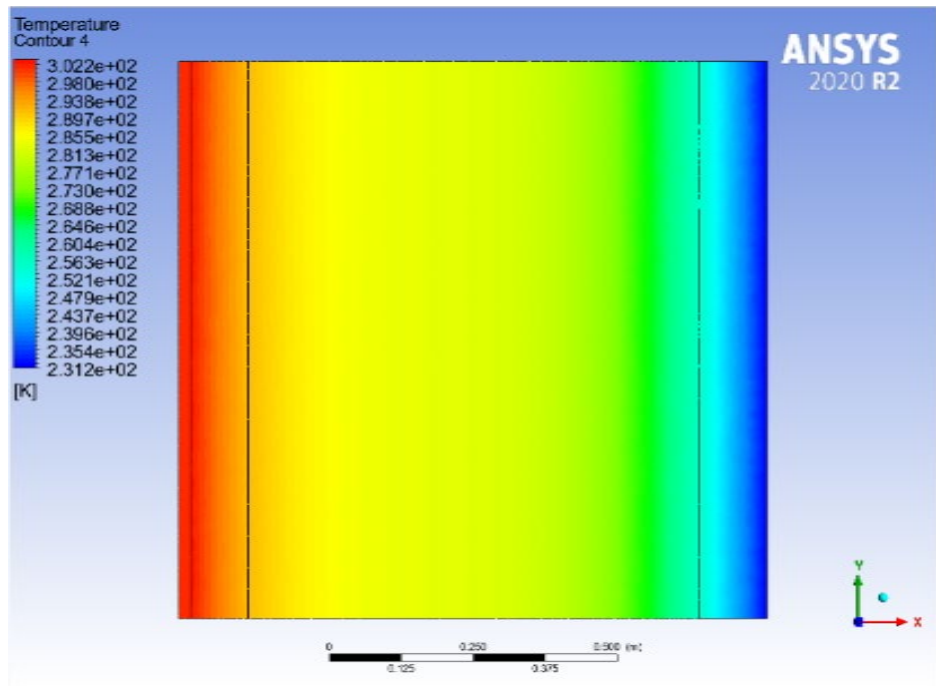


Fig. t=9h

A 9 heures, le profil de température est presque constant sur une grande section de l'épaisseur, seule l'extrémité demeurant légèrement plus fraîche, indiquant que le système s'oriente vers un équilibre thermique plus rapide.

Chapitre IV : Résultats et discussions :

IV.2. Evolution de profil des températures en fonction de l'épaisseur $h=90$:

Evolution de profil des températures à $T=20^{\circ}\text{C}$

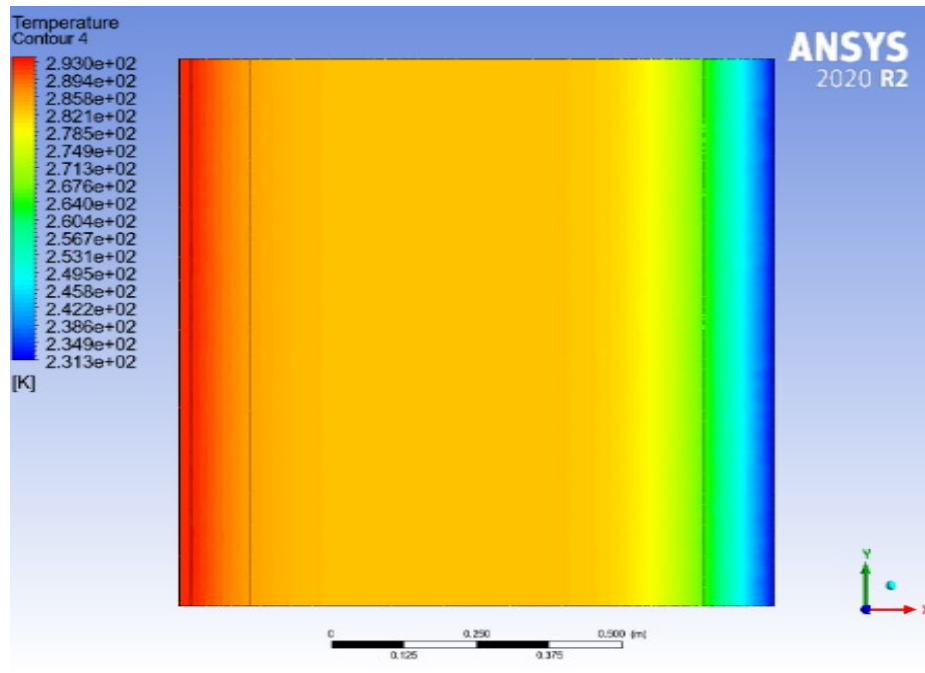


Fig. à $t=3\text{h}$

$t = 3\text{h}$: Un gradient thermique est bien visible, mais la pénétration de la chaleur reste encore limitée.

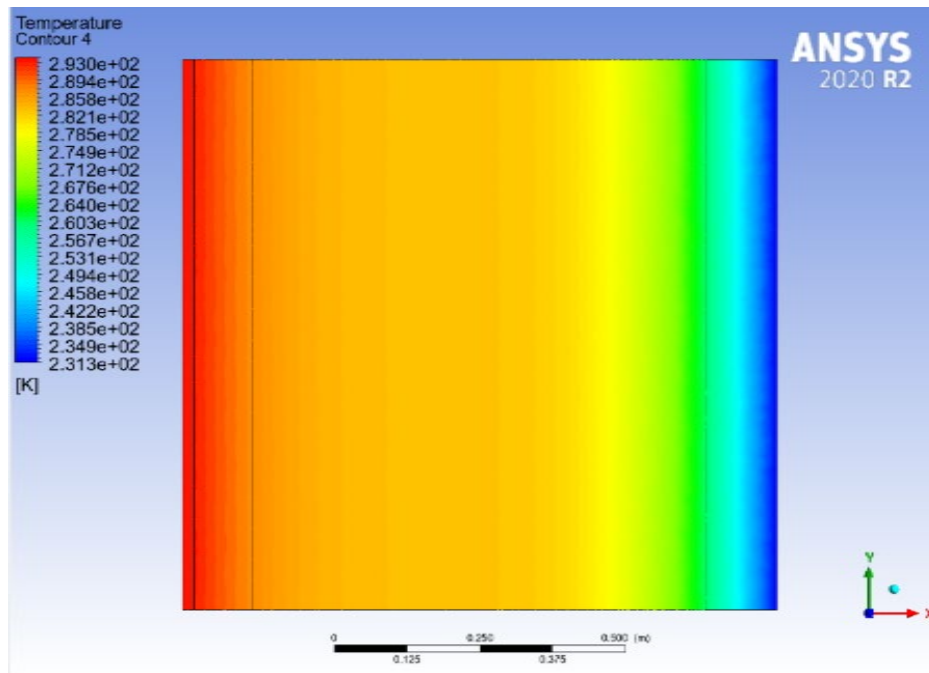


Fig. à $t=6\text{h}$

Chapitre IV : Résultats et discussions :

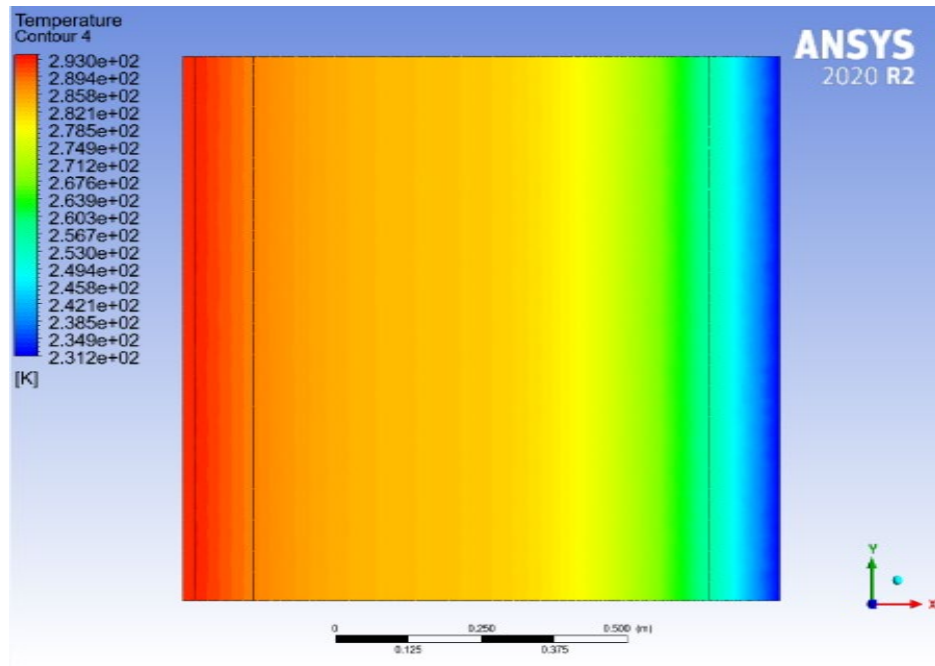


Fig. à t=9h

t = 6h et 9h : On observe une accélération du transfert thermique par rapport au cas où h = 10. La zone orange s'étend plus profondément, indiquant une propagation plus rapide de la chaleur.

Evolution de profil des températures à T=25°C

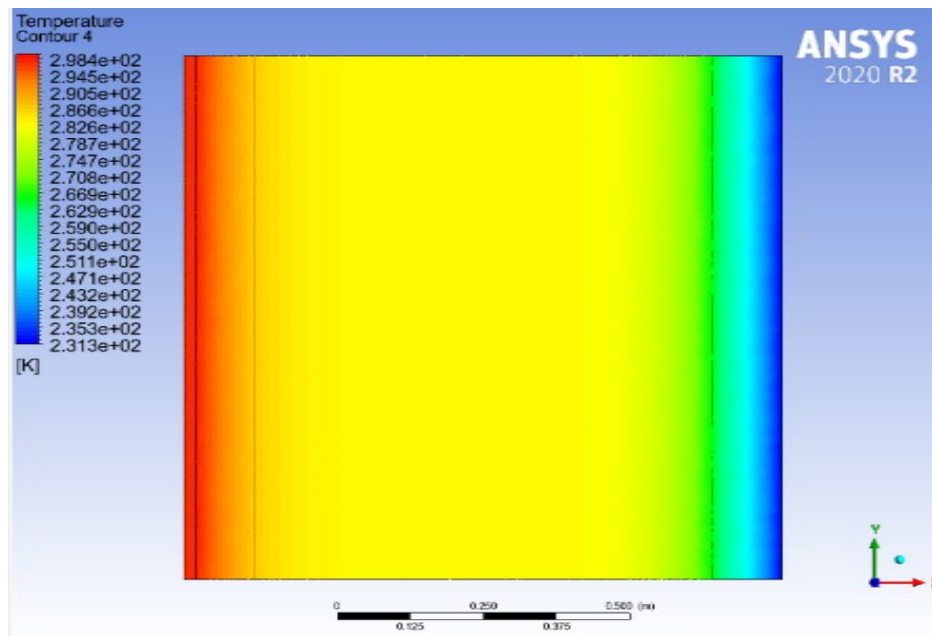


Fig. t= 3h

t = 3h : La distribution thermique commence par une élévation marquée de la température sur la surface exposée (zone rouge).

Chapitre IV : Résultats et discussions :

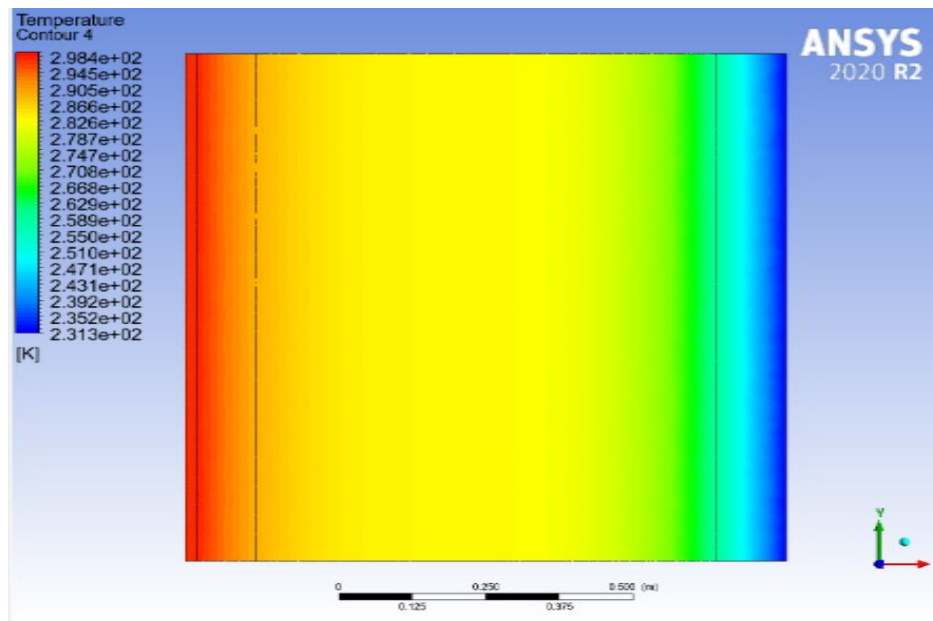


Fig. $t = 6h$

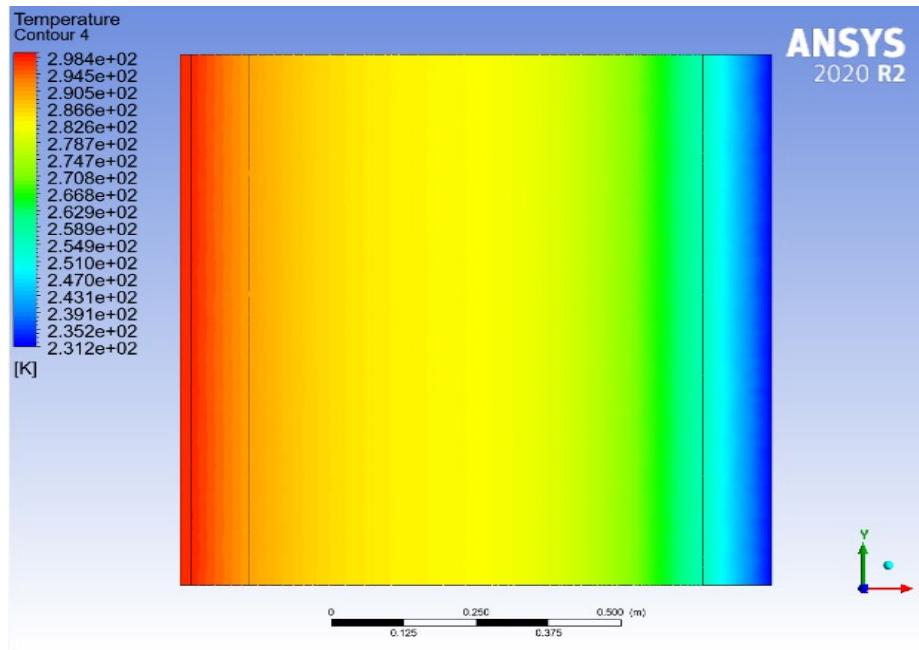


Fig. à $t=9h$

$t = 6h$ et $9h$: L'extension des couleurs jaune et orange vers l'intérieur indique une propagation plus rapide de la chaleur comparée au cas précédent ($T = 20^{\circ}\text{C}$).

L'augmentation de la température extérieure entraîne une différence de température plus importante, ce qui augmente le flux thermique vers l'intérieur du mur.

Chapitre IV : Résultats et discussions :

Evolution de profil des températures à $T=30^{\circ}\text{C}$

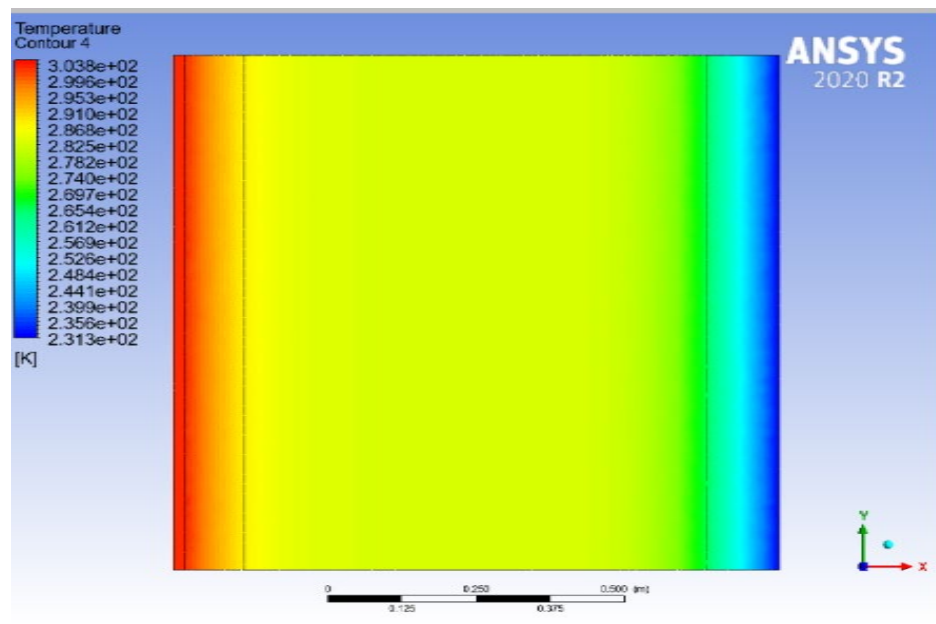


Fig. à $t=3\text{h}$

À $t = 3\text{h}$, un gradient thermique important est observé, avec une chaleur limitée à la surface externe.

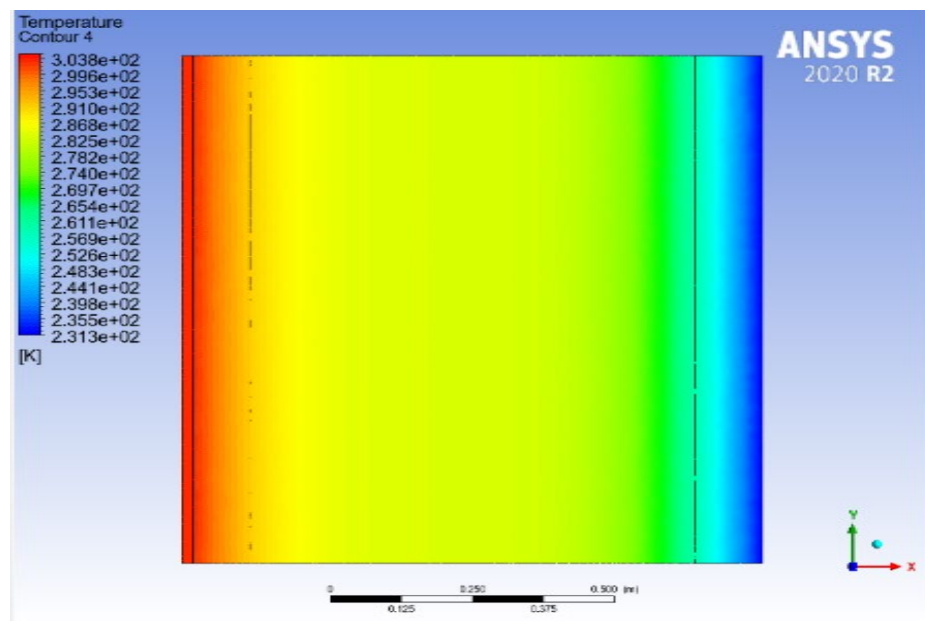


Fig. à $t=6\text{h}$

À $t = 6\text{h}$, la chaleur se propage progressivement à travers la paroi, réduisant les écarts thermiques.

Chapitre IV : Résultats et discussions :

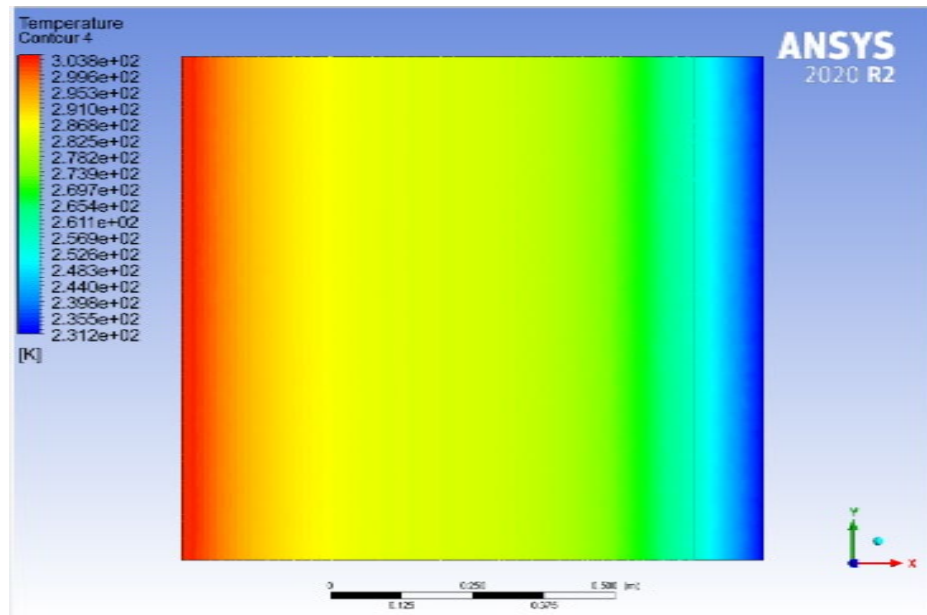


Fig. à t=9h

À $t = 9h$, le profil devient plus uniforme, indiquant une tendance vers l'équilibre thermique.

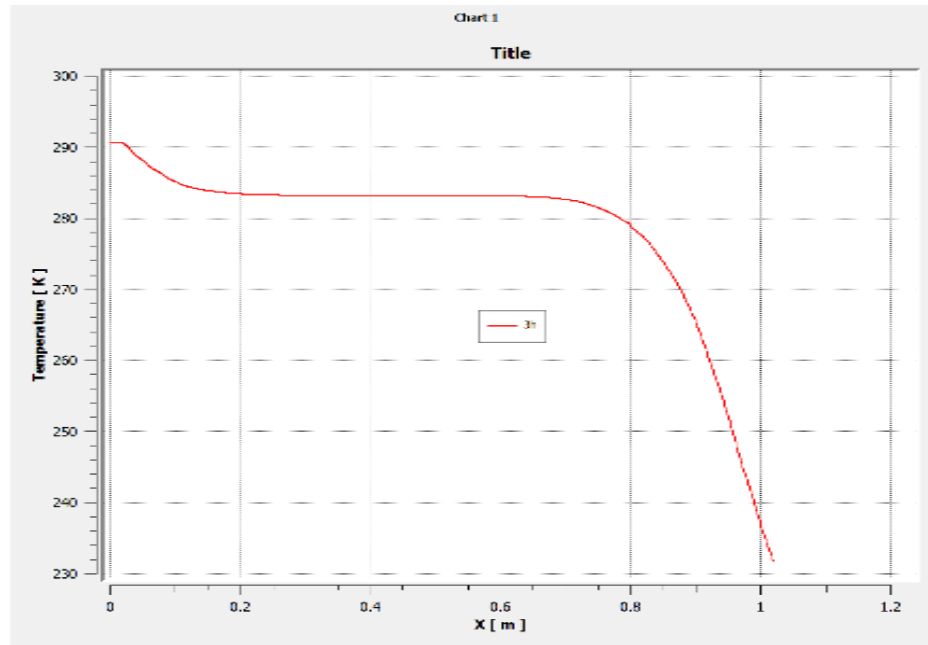
L'augmentation de la température extérieure à 30°C accélère le transfert de chaleur, ce qui réduit encore plus les écarts thermiques par rapport aux simulations précédentes $T = 20^{\circ}\text{C}$ et $T = 25^{\circ}\text{C}$. Cela met en évidence l'impact direct des conditions extérieures sur la vitesse de dissipation et le comportement thermique du système.

Les graphes suivants représentent l'évolution de la température en fonction de la position dans la paroi pour différentes températures ambiantes ($T = 20^{\circ}\text{C}$, 25°C et 30°C) et à différents instants (3h, 6h, 9h), avec un coefficient de convection.

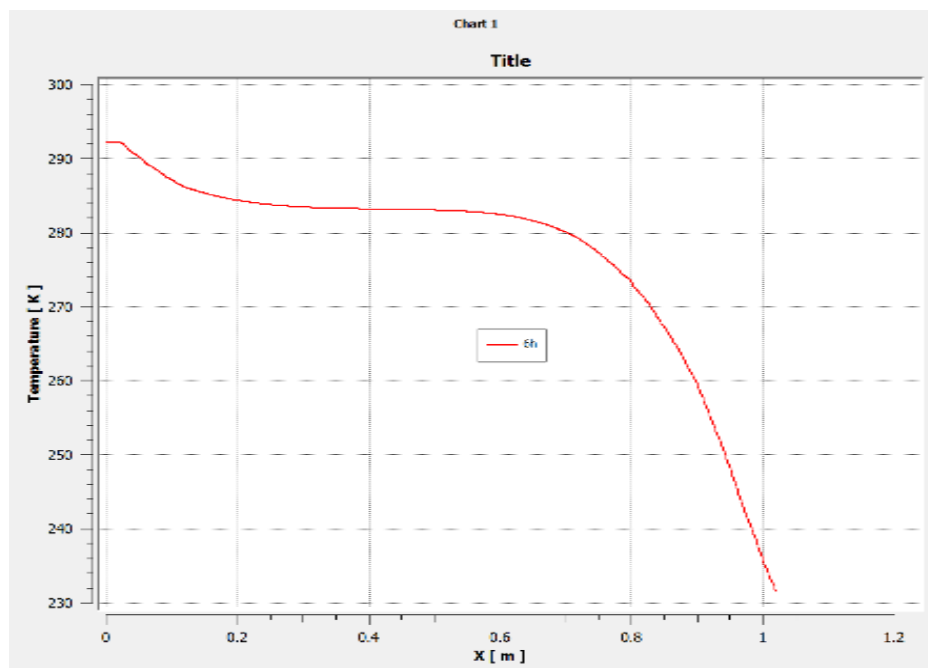
Chapitre IV : Résultats et discussions :

IV.3. Représentation des variations de la température en fonction de la paroi à $h=10\text{W/m}^2\text{K}$

Variation de la température à $T=20^\circ\text{C}$

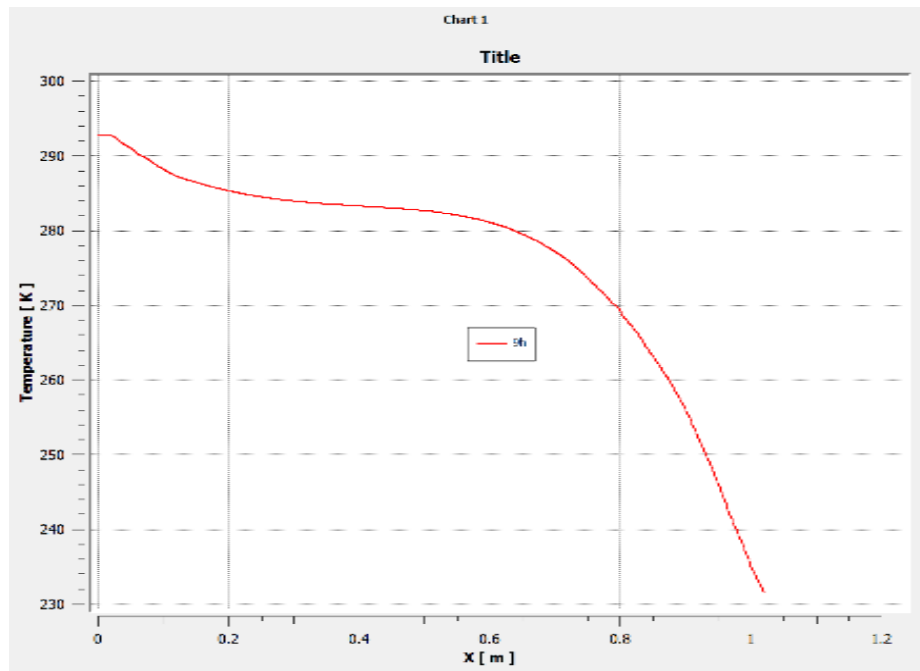


À 3 heures, le graphique montre une pente marquée près de la surface chaude, suivie d'une zone relativement plane avant une descente abrupte vers l'intérieur, indiquant que la chaleur n'est pas encore parvenue aux couches plus profondes.



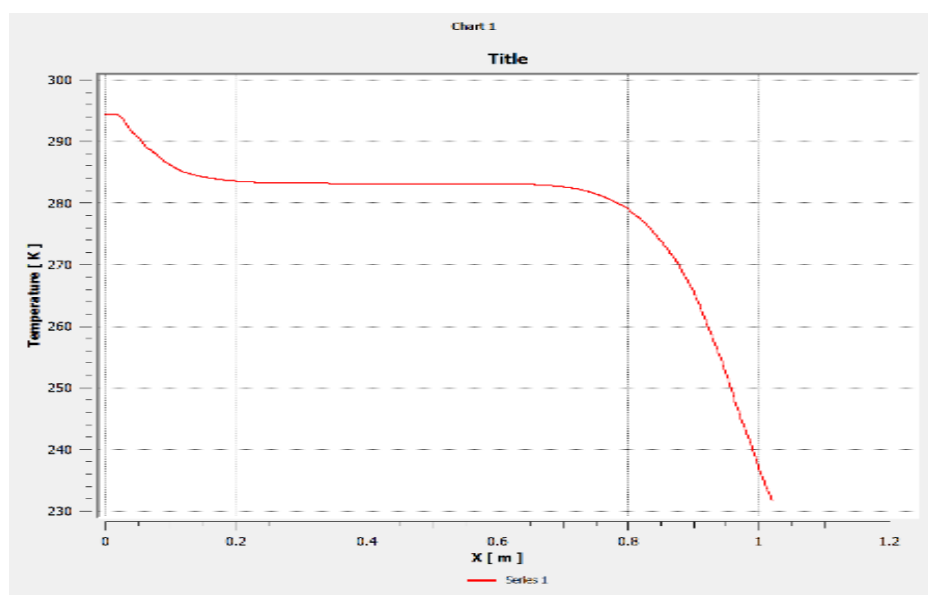
Chapitre IV : Résultats et discussions :

À 6 heures, la déclivité initiale persiste, cependant la descente se fait plus graduelle, reflétant une élévation de la température dans les strates internes par conduction



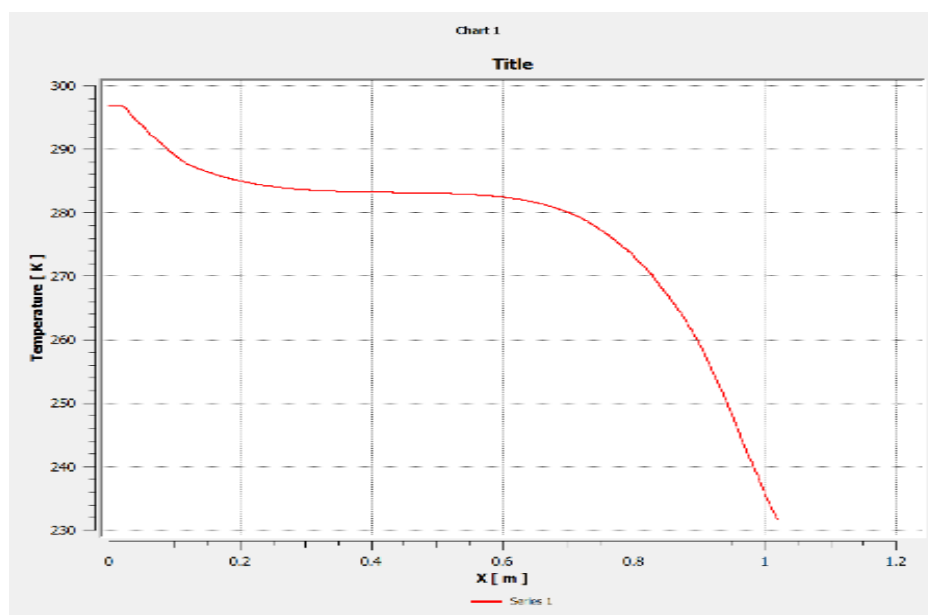
A 9 heures, la courbe montre une expansion plus importante avec une élévation progressive, indiquant que la chaleur s'est effectivement répartie dans l'ensemble du volume, bien que la zone près de l'extrémité n'ait pas encore atteint un équilibre thermique.

Variation de la température à T=25°C

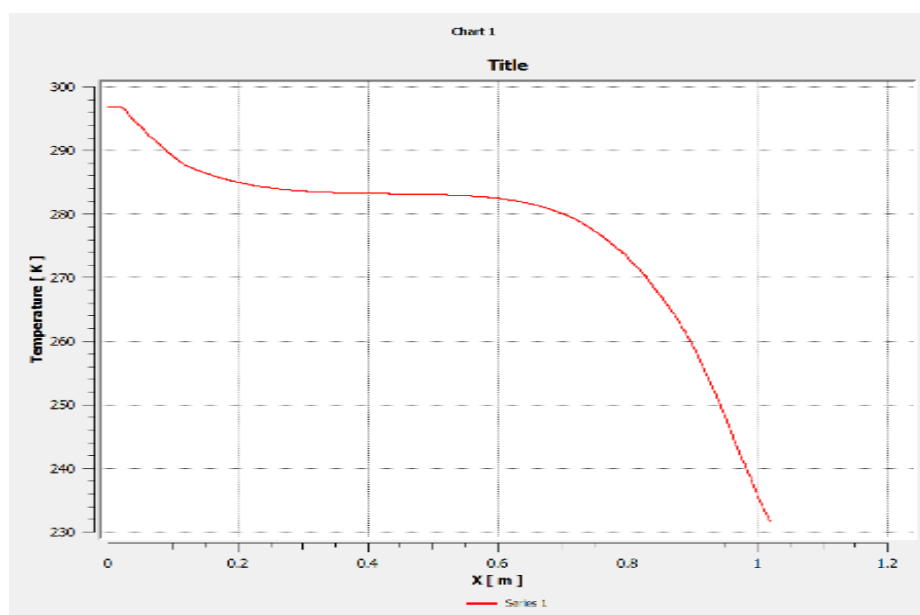


Chapitre IV : Résultats et discussions :

3h



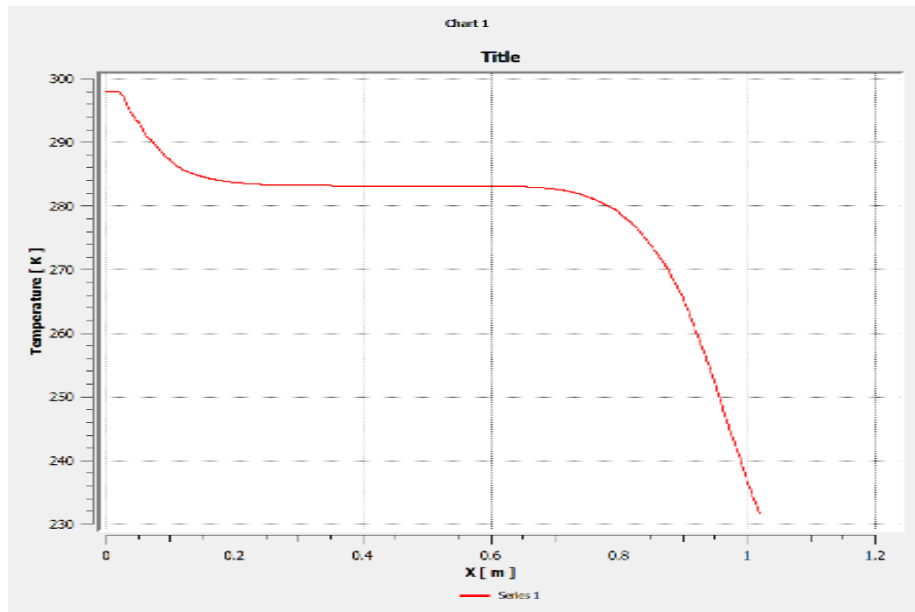
6h



9h

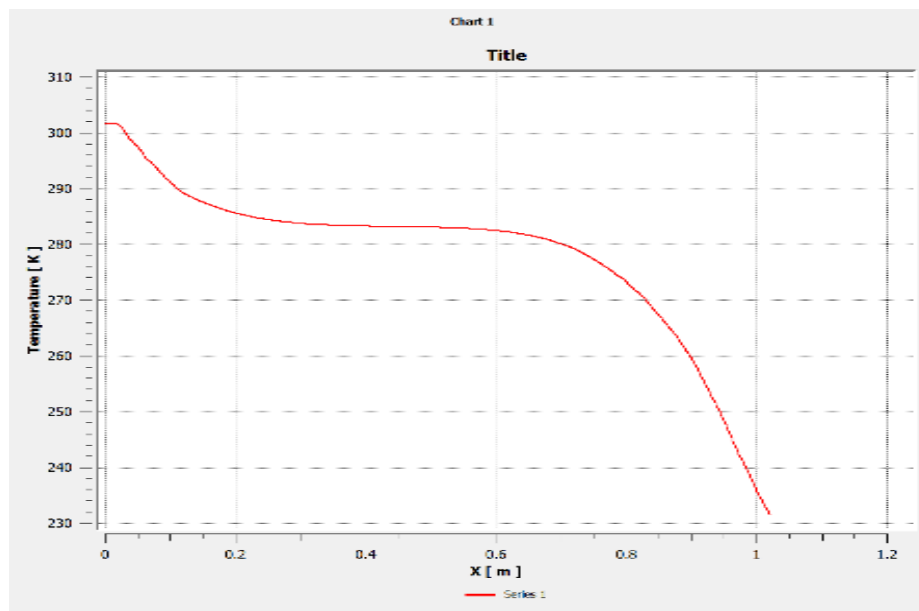
Chapitre IV : Résultats et discussions :

Variation de la température à $T=30^{\circ}\text{C}$



3h

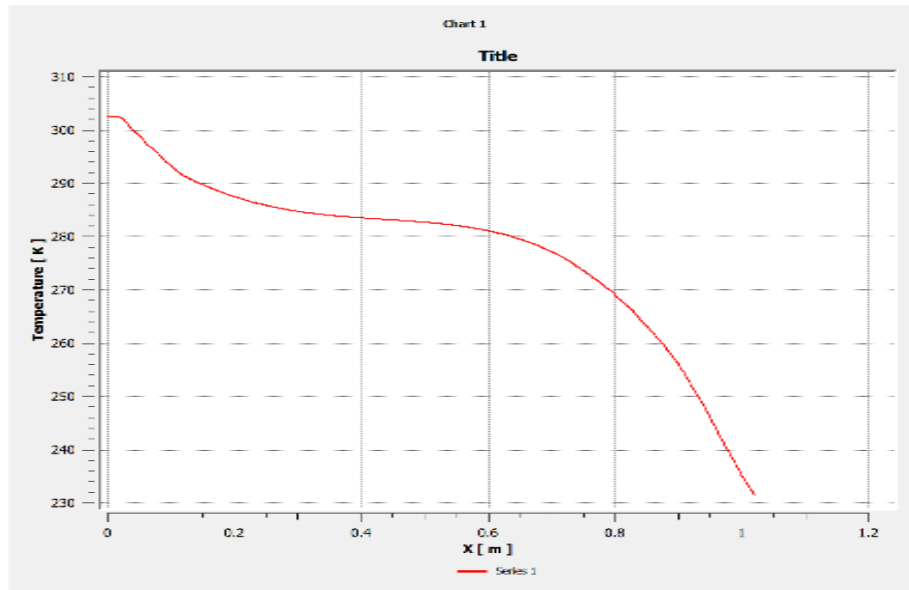
À 3 heures, la paroi présente une température supérieure à 20°C , témoignant d'une plus grande profondeur de pénétration thermique et d'un gradient plus prononcé, ce qui indique un apport énergétique amplifié.



6h

À 6 heures, la chaleur se propage davantage et la température au centre devient plus uniforme, signalant une conduction améliorée.

Chapitre IV : Résultats et discussions :

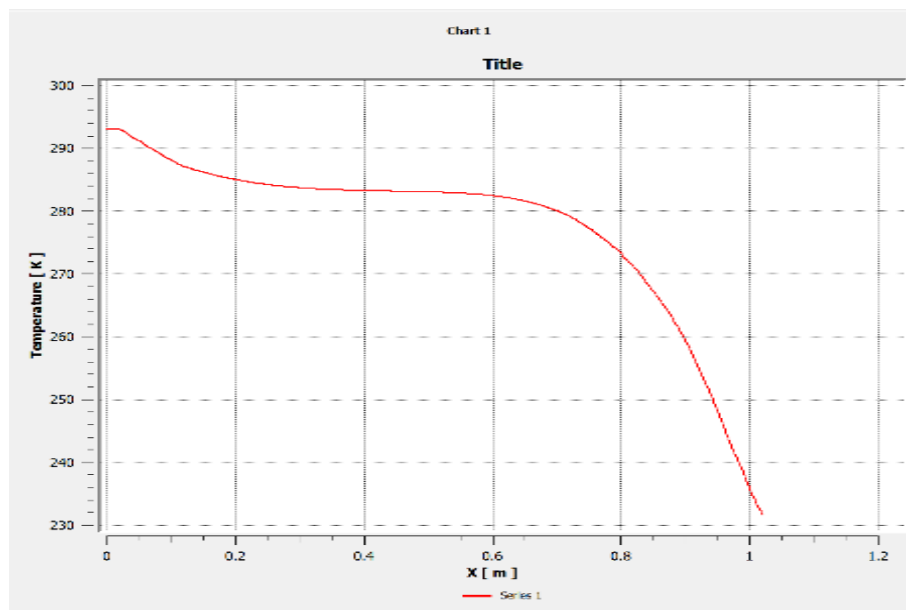


9h

À 9 heures, le profil présente une uniformité presque totale sur la majorité de l'épaisseur, excepté à l'extrémité qui est plus froide, indiquant que l'équilibre thermique est en train de se réaliser rapidement.

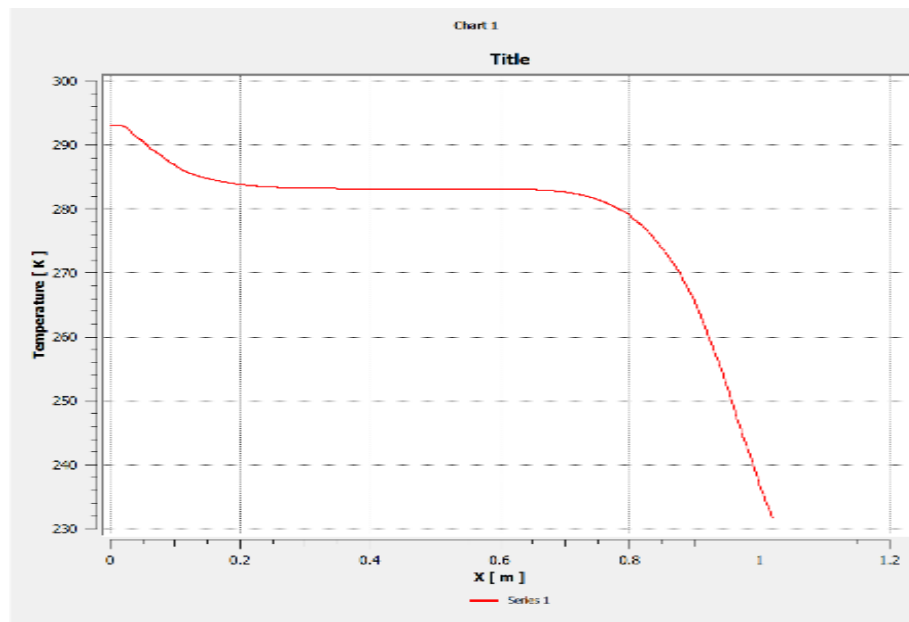
IV.7.4. Représentation des variations de la température en fonction de la paroi à $h=90\text{W/m}^2\text{K}$

Variation de la température en fonction de la paroi à $T=20^\circ\text{C}$

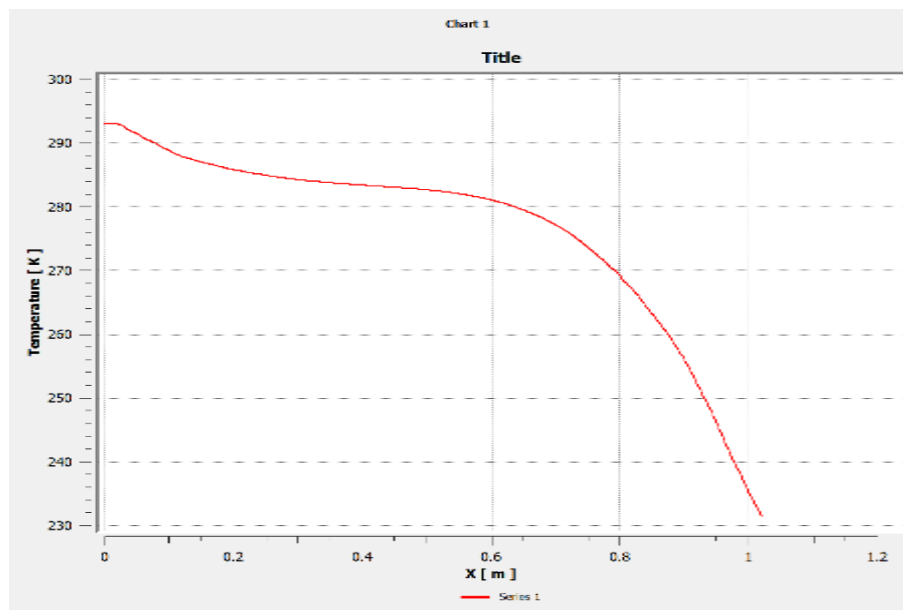


3h

Chapitre IV : Résultats et discussions :



6h



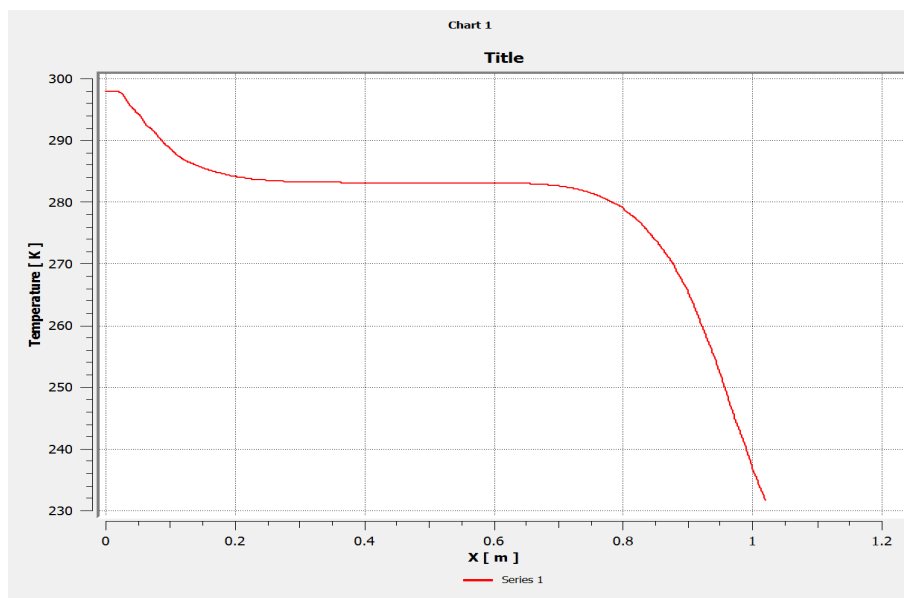
9h

Le long de la paroi (sur l'axe X), la température diminue graduellement, passant d'un niveau élevé à un niveau plus bas. Au fur et à mesure, entre 3h et 9h, le front de refroidissement s'infiltré plus en profondeur dans la paroi, tandis que la courbe de température prend une forme de plus en plus graduelle, indiquant une diffusion thermique qui se stabilise. Cette variation est due à la température initiale de la paroi, qui est plus élevée que celle de l'air extérieur (20°C),

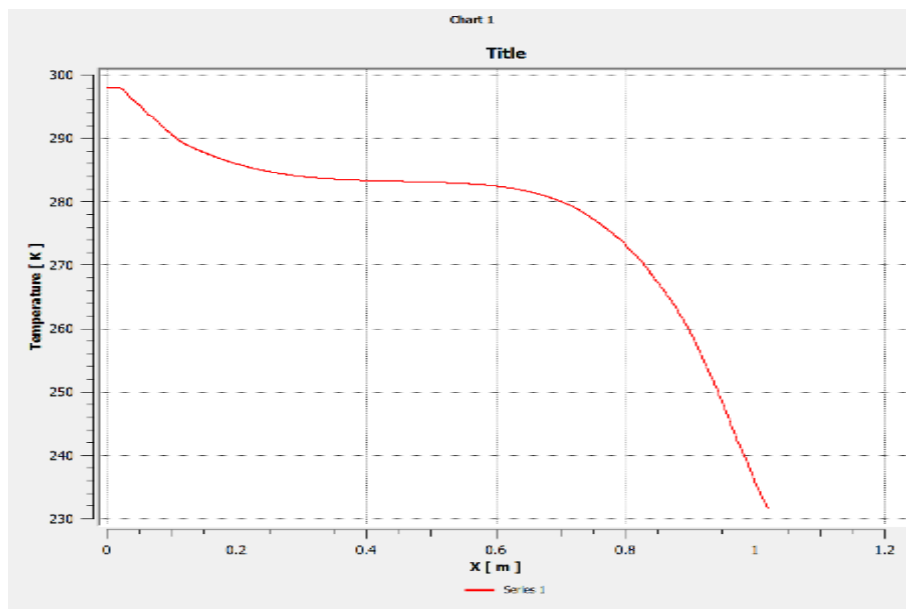
Chapitre IV : Résultats et discussions :

entraînant un transfert de chaleur de la paroi vers l'extérieur. Cette transmission découle de la conduction à l'intérieur du matériau et de la convection en surface. Par conséquent, la chaleur se dissipe progressivement : à 9h, le refroidissement a déjà considérablement influencé les strates profondes du mur.

Variation de la température à $T=25^{\circ}\text{C}$

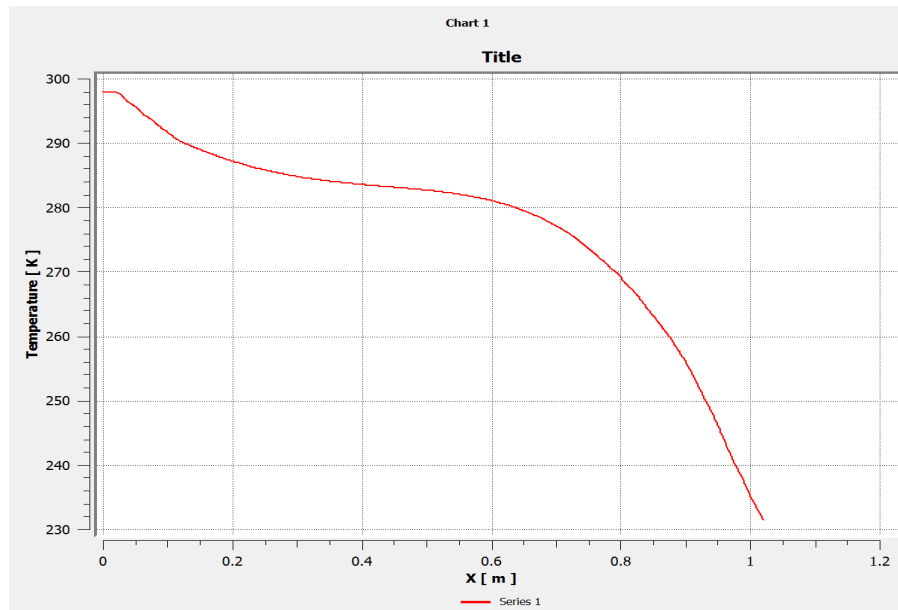


3h



6h

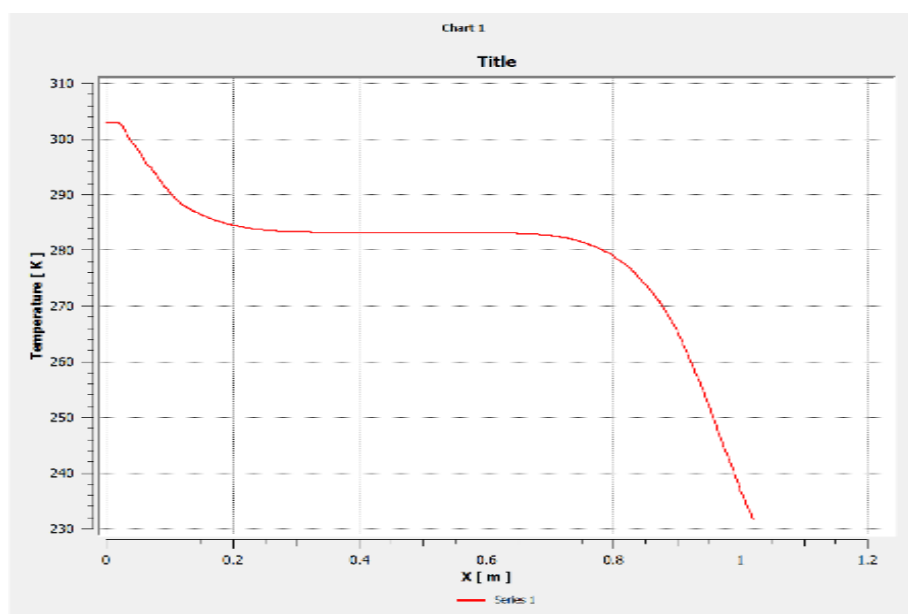
Chapitre IV : Résultats et discussions :



9h

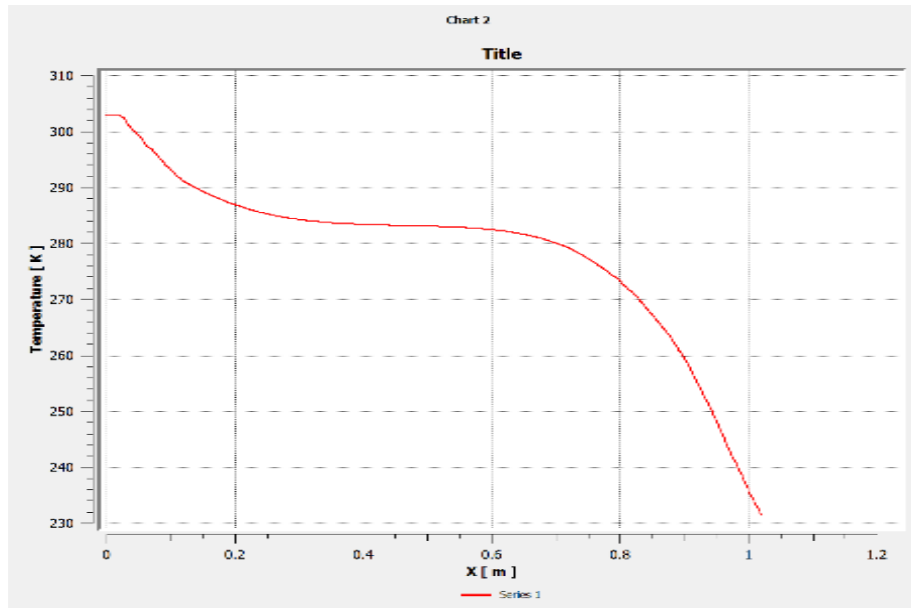
Les profils de température affichent des propriétés semblables à ceux notés à 20°C, toutefois avec des valeurs généralement plus hautes. L'avancement du front thermique à travers la paroi est confirmé par le changement temporel. Un gradient thermique moins prononcé est créé par une température ambiante plus élevée (25°C), ce qui ralentit le passage de la chaleur. Cette atténuation se traduit par des courbes moins abruptes, illustrant une transition thermique plus graduelle. À 9h, la pénétration de la chaleur est inférieure à celle à 20°C, confirmant ainsi la diminution du flux thermique.

Variation de la tempérassions à T=30°C

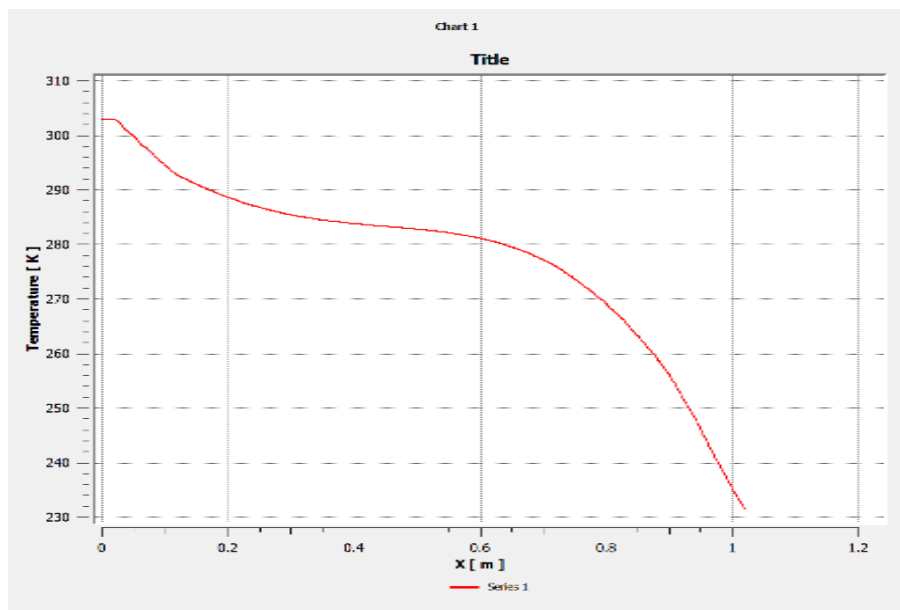


3h

Chapitre IV : Résultats et discussions :



6h



9h

Initialement, la température à la surface de la paroi est encore supérieure, présentant un gradient thermique plus progressif. À 9h, le profil démontre une pénétration thermique plus avancée, suggérant que la température affecte davantage l'intérieur de la paroi. Cette circonstance est due à une température ambiante haute (30°C), qui entraîne un réchauffement graduel de la paroi par convection externe. Le flux thermique se renverse donc, se dirigeant de l'air environnant vers la paroi, ce qui indique une concentration de chaleur dans le matériau. Par conséquent, à neuf heures, une plus grande portion de la paroi a observé une augmentation de sa température.

Chapitre IV : Résultats et discussions :

Conclusion générale

L'utilisation du logiciel ANSYS pour la simulation numérique de la conduction thermique transitoire à travers les parois d'un réservoir de GPL a permis de représenter fidèlement l'évolution temporelle des profils thermiques et des contours de température en deux dimensions sous diverses conditions de convection. Les simulations réalisées avec divers coefficients de convection et températures ambiantes ont démontré l'impact significatif des conditions extérieures sur la dynamique du transfert thermique à travers la paroi multicouche du réservoir.

Les observations indiquent qu'avec un coefficient de convection externe faible, la diffusion de la chaleur à travers la paroi est assez lente : la température se stabilise graduellement et l'équilibre thermique n'est obtenu qu'après plusieurs heures. Par contre, un coefficient de convection fort accélère considérablement la dissipation de la chaleur, ce qui favorise une augmentation rapide de la température à l'intérieur du bac ce qui influe sur le GPL stocké, surtout en présence d'une température ambiante élevée.

L'utilisation de la simulation numérique a permis aussi de mesurer le flux thermique qui pénètre dans le GPL, un paramètre essentiel pour prévoir les dangers liés au phénomène de Boil-off et les contraintes thermomécaniques imposées à la structure. L'examen des divers matériaux isolants (acier, perlite, PUF, laine de verre) a souligné l'importance de la sélection et de l'épaisseur des couches d'isolation pour réduire les déperditions thermiques et assurer la constance du stockage.

Enfin, le recours à ANSYS pour traiter la conduction thermique non stationnaire s'est avéré être un moyen efficace d'analyser, de prédire et d'optimiser le comportement thermique des réservoirs de GPL dans des conditions réalistes. Cette méthode offre la possibilité de renforcer non seulement la sécurité et la performance énergétique des systèmes, mais également de guider les décisions de conception (matériaux, épaisseurs, dispositifs de protection) en tenant compte des exigences opérationnelles et environnementales. Les résultats obtenus permettent d'envisager une gestion plus précise des risques thermiques et une meilleure compréhension des phénomènes transitoires lors du stockage du GPL.

Chapitre IV : Résultats et discussions :

Bibliographie

1. Ait Ferhat « Etude thermique par analyse système de l'ensemble réservoirs GNL par interaction avec l'environnement », Mémoire de Magistère, FHC, Université M'Hamed Bougara Boumerdès, 2004
<https://www.ccdz.cerist.dz/admin/notice.php?id=121388>
2. Hariti Rafika, « Modélisation des infiltrations thermiques dans le bac de stockage de GNL », Mémoire de Magistère, FHC, Université M'Hamed Bougara Boumerdès, 2007
<http://dlibrary.univ-boumerdes.dz:8080/bitstream/123456789/1954/1/Hariti%20Rafika.pdf>
3. Kemmoukh Khalil Chahr eddine, Chebboub Abdalhak, « GPL et échangeurs de chaleur », Mémoire de Master, UKM Ouargla. 2020
<https://dspace.univ-ouargla.dz/jspui/bitstream/123456789/29294/1/m%C3%A9moire.pdf>
4. Hamzaoui.M « Simulation numérique du comportement thermique d'un réservoir de stockage de propane », Mémoire de Master, Université MOULOUD MAMMERI - Tizi-Ouzou, 2015
<https://dspace.ummto.dz/server/api/core/bitstreams/1cb2d2b7-f188-4626-a63f-eeeb516c82cd/content>
5. Mecerli Billel, Guezzoune Yacine, « Amélioration de l'isolation thermique dans un bac de stockage de "GPL" » Mémoire de Master, FHC, Université M'Hamed Bougara Boumerdès, 2023.
<http://dlibrary.univ-boumerdes.dz:8080/jspui/handle/123456789/12343>