

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
Ministère de l'enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université M'Hamed Bougara-Boumerdes
Faculté des Hydrocarbures et de la Chimie



Département Transport et Equipements des Hydrocarbures

Mémoire de fin d'études
En vue de l'obtention du diplôme de

Master

Domaine : Sciences et Technologies

Filière : Hydrocarbure

Option : Génie mécanique-Mécanique des unités Pétrochimiques...

Présenté par : -MECERLI Bilal
-GUEZZOUN Yacine

THEME

**Amélioration de l'isolation thermique dans un bac de stockage de
GPL**

Devant le jury :

	Nom et Prénom	Grade	Université/Affiliation
Examineur	MEFTAH Sihame	MCA	UMBB
Examineur	SAHNOUNE Khalede	MCB	UMBB
Examineur	HALOUANE Yacine	MCA	UMBB
Encadreur	KHELIFI TOUHAMI Md Salah	MCB	UMBB

Remerciement

Nous remercions Dieu tout puissant pour nous avoir accordé la force pour réaliser ce modeste travail.

Nous tenons à remercier notre encadreur Dr. KHELIFI TOUHAMI Mohamed Salah pour ses conseils, son encadrement, son suivi et tout le temps qu'il nous a consacré durant la période de notre collaboration.

Un grand merci au staff pédagogique et administratif de la FHC, particulièrement les enseignants du département qui nous a donné le meilleur d'eux même

Nous tenons à remercier Mr. CHALABI Abdelmadjid, Mr. BOUHALI, Mme MAHI et Mme RIHAMI, les ingénieurs du complexe GP1Z qui nous ont fourni de l'information tout au long de notre stage pratique

Nos vifs remerciements aux membres de jury qui ont accepté de juger notre présent travail

En fin, nous remercions nos parents et tous ceux qui ont contribué du près ou de loin à l'accomplissement de ce travail.

Dédicace

C'est avec profonde gratitude et sincères mots que je dédie ce modeste mémoire de master, fruit de très longues années d'étude à :

Ma belle rose maman et mon cher père, pour leurs sacrifices et soutient tout au long de mon cursus...

Mon frère Sofiane et mes sœurs, pour leur encouragement durant ces longues années de formations...

Ma famille et tous mes proches...

Mon binôme et sa famille...

Mes amis et tous ceux qui font partie à mon succès du loin ou du proche...

Et dans cette journée particulière, je dédie ce travail à mon grand-père Moussa décédé et qui était toujours mon exemple dans la vie...

MECERLI Bilal

Aux meilleurs parents mon père et ma très chère maman qu'ils trouvent en moi la source de leur fierté à qui je dois tout. Ce travail est le fruit de vos sacrifices que vous êtes consentis pour mon éducation.

À ma chère sœur et chers frères avec tous mes vœux de les voir réussir dans leurs vies.

À mes amis, à qui je souhaite le succès en les remerciant pour l'amitié qui nous a toujours unis.

GUEZZOUN Yacine

Résumé :

Le but de ce travail est d'étudier le phénomène de Boil-Off qui se produit dans les bacs de stockage de propane du complexe GPIZ qui appartiennent à la société nationale SONATRACH. Au niveau de ce complexe, des différents types de bacs sont installés afin de stocker le GPL traité et liquéfié. Cette différenciation de structures de ces aires de stockage est en effet en types des isolants utilisés dans leurs constructions. A cet effet nous avons mené une étude sur l'effet des isolants sur les pertes et le taux d'évaporation pour le bac T0001.

Le propane qui est stocké à une température cryogénique ($-42\text{ }^{\circ}\text{C}$), a un rôle important sur le marché mondial du GPL. Lors de processus de stockage de propane, une partie s'évapore en phase gazeuse à cause des infiltrations thermiques. Ce phénomène d'évaporation entraîne un changement dans la composition du liquide stocké et il a un effet négatif sur la stabilité et la sécurité de processus de stockage. Le taux d'évaporation doit être déterminé avec précision, pour cela on a utilisé des relations et des équations bien étudiées, ainsi on a utilisé un logiciel de simulation Ansys 20.2 pour vérifier nos résultats. Les résultats obtenus montrent que le taux d'évaporation est affecté principalement par le milieu ambiant et le niveau de remplissage du bac.

Abstract :

The purpose of this work is to study the Boil-Off phenomenon that occurs in the propane storage tanks of the GPIZ complex owned by the national company SONATRACH. Various types of tanks are installed in this complex to store treated and liquefied LPG. The types of insulation used in their construction determine this differentiation in the structure of these storage areas. To this end, we conducted a study on the effect of insulation on losses and the evaporation rate for tank T0001.

Propane, which is stored at cryogenic temperatures ($-42\text{ }^{\circ}\text{C}$), plays an important role in the global LPG market. During the propane storage process, a portion evaporates in the gaseous phase due to thermal infiltrations. This evaporation phenomenon leads to a change in the composition of the stored liquid and has a negative effect on the stability and safety of the storage process. The evaporation rate needs to be accurately determined, for which we used well-studied relationships and equations, and we employed simulation software, Ansys 20.2, to verify our results. The obtained results show that the ambient environment mainly affects the evaporation rate and the tanks fill level.

ملخص :

الهدف من هذا العمل هو دراسة ظاهرة تبخر الغاز الناتجة في خزانات تخزين البروبان في مجمع GPIZ التابع للشركة الوطنية سوناطراك. يتم تثبيت أنواع مختلفة من الخزانات في هذا المجمع لتخزين الغاز البترولي المسال المعالج والمتجمد. يتم تمييز هذا التفاوت في هياكل مناطق التخزين هذه بناءً على أنواع العوازل المستخدمة في بنائها. لهذا الغرض، أجرينا دراسة حول تأثير العوازل على الخسائر ومعدل التبخر للخزان T0001.

يلعب البروبان، الذي يتم تخزينه عند درجة حرارة تجمدية (-42 درجة مئوية)، دورًا مهمًا في السوق العالمية للغاز البترولي المسال. خلال عملية تخزين البروبان، يتبخر جزء منه في الحالة الغازية بسبب التسربات الحرارية. تؤدي هذه الظاهرة التبخرية إلى تغيير في تركيبة السائل المخزن ولها تأثير سلبي على استقرار وأمان عملية التخزين. يجب تحديد معدل التبخر بدقة، ولهذا الغرض استخدمنا علاقات ومعادلات مدروسة بعناية، واستخدمنا أيضًا برنامج المحاكاة Ansys 20.2 للتحقق من نتائجنا. تُظهر النتائج المستخلصة أن معدل التبخر يتأثر بشكل رئيسي بالبيئة المحيطة ومستوى ملء الخزان.

Sommaire

1	Généralités sur le GPL	2
1.1	Définition de GPL :	3
1.2	Les sources de GPL :	3
1.3	Caractéristiques générales des GPL :	3
1.4	Domaine d'utilisation de GPL :	5
1.5	Avantages et inconvénients de GPL :	8
1.5.1	Avantages :	8
1.5.2	Inconvénients :	8
2	Stockage des gaz liquéfiés	9
2.1	Introduction :	10
2.2	Stockage cryogénique :	10
2.3	Stockage aérien sous pression :	11
2.3.1	Les réservoirs cylindriques :	11
2.3.2	Les réservoirs sphériques :	12
2.4	Stockage sous talus :	13
3	Description de l'unité GP1Z	14
3.1	Situation géographique :	15
3.2	Objet :	15
3.3	Histoire :	15
3.4	Principales installations :	16
3.5	Capacité :	17
3.6	Description de procédé de production :	17
3.6.1	Section de stockage d'alimentation :	17
3.6.2	Section de déshydratation :	17
3.6.3	Section de séparation :	18
3.6.4	Section de réfrigération :	18
3.6.5	Section de l'huile chaude :	18
3.6.6	Section des utilités :	18
3.6.7	Section de stockage des produits :	18
3.7	Section BOG :	19
3.8	Section de torche HP et BP :	19
3.9	Section de chargement des produits finaux :	19
4	Transfert de chaleur	21

4.1	Introduction.....	22
4.2	Les trois modes de transfert de chaleur.....	22
4.2.1	Transfert de chaleur par conduction.....	22
4.2.2	Transfert de chaleur par convection.....	22
4.3	Transfert de chaleur par rayonnement.....	23
4.4	Etude de cas : Transfert de chaleur par conduction en régime permanent.....	23
4.4.1	Transfert unidirectionnel.....	23
5	Paramètres de fonctionnement et problématique.....	27
5.1	Introduction :.....	28
5.2	Conditions de fonctionnement :.....	28
5.2.1	La pression :.....	28
5.2.2	La température :.....	29
5.3	Niveau :.....	29
5.4	Débit et température à l'entrée et à la sortie du bac :.....	29
5.5	Propriétés de produit :.....	29
5.6	Structure du bac T0001 :.....	30
5.7	Matériaux de construction du bac T0001 :.....	30
5.8	Le problème d'évaporation :.....	31
6	Détermination de taux d'évaporation.....	32
6.1	Introduction :.....	33
6.2	Estimation des pertes par évaporation :.....	33
6.3	Calcul de taux d'évaporation :.....	33
6.3.1	1 ^{er} cas : bac en réception :.....	33
6.3.2	2 ^{eme} cas : bac en repos :.....	36
6.3.3	3 ^{eme} cas : bac en expédition :.....	45
7	Partie logiciel, résultats et discussion.....	48
7.1	Introduction :.....	49
7.2	Présentation de logiciel de calcul :.....	49
7.3	Description du problème :.....	49
7.4	Propriétés du liquide et matériaux utilisés :.....	49
7.5	Modèle utilisé par le logiciel :.....	49
7.6	Conditions aux limites :.....	50
7.7	La géométrie :.....	51
7.8	Le maillage :.....	51
7.9	Résultats et discussions :.....	53

7.9.1	Evolution de la densité de flux de chaleur en fonction de l'épaisseur :.....	53
7.9.2	Evolution de profil des températures en fonction de l'épaisseur :.....	54
7.9.3	Représentation des variations de la température en fonction de la paroi en présence de perlite	55
7.9.4	Représentation des variations de la densité de flux de chaleur en fonction de la paroi du bac en présence de perlite	56
7.9.5	Cas de changement de l'isolant « perlite » par « Foam expanded polystyrene » :	57
7.9.6	Caractéristiques du nouveau matériau « Foam expanded polystyrene » :	57
7.9.7	Evolution de profil des températures en fonction de l'épaisseur :.....	58
7.9.8	Evolution de la densité de flux de chaleur en fonction de l'épaisseur :.....	59
7.9.9	Représentation des variations de la température en fonction de la paroi du bac en présence d'un isolant proposé	60
7.9.10	Représentation des variations de la densité de flux de chaleur en fonction de la paroi du bac en présence d'un isolant proposé	61
7.9.11	Comparaison des densités de flux de chaleur	62
Conclusion générale :		65

Liste des figures

Figure 1-1 : Utilisation de GPL dans la cuisine.....	5
Figure 1-2 : Utilisation de GPL comme carburant automobile.....	6
Figure 1-3 : Utilisation de GPL pour le chauffage.....	7
Figure 1-4 : Le GPL dans la climatisation.....	7
Figure 2-1 : Eléments constitutifs d'un réservoir cryogénique	11
Figure 2-2 : Exemple d'un réservoir cylindrique	12
Figure 2-3 : Exemple d'un réservoir sphérique	12
Figure 2-4 : Exemple d'un réservoir sous talus	13
Figure 3-1 : Vue générale de deux trains	16
Figure 3-2 : Plan de masse du complexe GP1Z.....	17
Figure 3-3 : Vue générale des bacs de stockage.....	19
Figure 3-4 : Procédés de production dans le complexe GP1Z.....	20
Figure 4-1 : schéma de transfert de chaleur conductif	22
Figure 4-2 : schéma de transfert de chaleur convectif.....	23
Figure 4-3 : schéma de transfert de chaleur radiatif.....	23
Figure 4-4 : Bilan thermique élémentaire sur un mur simple	24
Figure 4-5 : Schéma de flux et température dans un mur multicouches.....	25
Figure 4-6 : Schéma du transfert de chaleur dans un cylindre creux.....	25
Figure 4-7 : Schéma du transfert de chaleur dans un cylindre creux multicouche.....	26
Figure 5-1 : Vue générale de bac de stockage de propane T0001	28
Figure 5-2 : Structure du bac T0001	30
Figure 6-1 : Schéma de la surface A du fond du bac	37
Figure 6-2 : Schéma de la surface B de fond du bac	38
Figure 6-3 : Schéma de la surface C de fond du bac.....	38
Figure 6-4 : Schéma de la surface A de latéral du bac	39
Figure 6-5 : Schéma de la surface B de latéral du bac.....	40
Figure 6-6 : Schéma de la surface C de latéral du bac.....	42
Figure 6-7 : Les paramètres de réception du bac T0001	46
Figure 7-1 : Maillage de la paroi du bac	52
Figure 7-2 : Vue rapprochée du maillage de la paroi.....	52
Figure 7-3 : Evolution de densité de flux de chaleur en fonction de l'épaisseur de la paroi	53
Figure 7-4 : Evolution de la température en fonction de l'épaisseur de la paroi	54
Figure 7-5 : Variation de la température en fonction de la paroi du bac	55
Figure 7-6 : Variation de la densité de flux de chaleur en fonction de la paroi du bac	56
Figure 7-7 : Evolution de profile des températures en utilisant le nouveau matériau.....	58
Figure 7-8 : Evolution de la densité de flux de chaleur en utilisant le nouveau matériau.....	59
Figure 7-9 : Variation de la température en fonction de la paroi du bac	60
Figure 7-10 : Variation de la densité de flux de chaleur en fonction de la paroi du bac	61
Figure 7-11 : Comparaison des densités de flux de chaleur en fonction du temps	62

Liste des tableaux

Tableau 1-1 : Composition d'un exemple de GPL	3
Tableau 5-1 : Pression de service du bac T0001.....	29
Tableau 5-2 : Pression et température de fonctionnement du bac T0001	29
Tableau 5-3 : Débit et température d'entrée et de sortie du bac T0001.....	29
Tableau 5-4 : Caractéristique du produit stocké	30
Tableau 5-5 : Caractéristiques des matériaux de construction du bac T0001	31
Tableau 6-1 : Les paramètres de réception du bac T0001	34
Tableau 6-2 : Paramètres et débits de sorti des trains	35
Tableau 6-3 : Quantité de chaleur totale quotidienne.....	45
Tableau 7-1 : Propriétés des matériaux utilisés	49
Tableau 7-2 : Caractéristique du nouveau matériau.....	57
Tableau 7-3 : Comparaison des masses du liquide évaporé	63

Nomenclature

Symboles

Q_T : quantité de chaleur totale transmise au propane
à travers la surface du bac (W)

V : volume total du bac (m^3)

L : chaleur latente de propane (W.hr/kg)

ρ : masse volumique de propane (kg/m^3)

U : coefficient de transfert de chaleur ($W/m^2.K$)

e : épaisseur de la couche d'isolation (m)

λ : conductivité thermique du matériau ($W/m.K$)

A,B,C,S : surface d'échange (m^2)

T_0 : température ambiante ($^{\circ}C$)

T_1 : température moyenne de liquide de la surface
de fond du bac ($^{\circ}C$)

H : hauteur de la surface d'échange (m)

D : diamètre intérieur et extérieur de l'isolant (m)

q : flux de chaleur (W)

t_2, t_3 : température d'équilibre de surface ($^{\circ}C$)

ε_1 : facteur d'émission de la surface, radiation du
toit bombé

ε_2 : facteur d'émission de la surface, radiation de la
surface supérieur de l'isolation du toit suspendu

d : diamètre de base du bac (m)

h : hauteur de niveau de liquide (m)

t : temps (s)

τ : taux d'évaporation (%)

1,05* : facteur de fuite de chaleur divers

m_{evap} : masse de propane évaporée (kg/s)

V_{evap} : volume de propane évaporé (kg/jour)

Abréviations

GPL : gaz de pétrole
liquéfié

PCI : pouvoir calorifique

GP1Z : complexe de gaz
de pétrole 1 d'
Arzew

GNL : gaz naturel
liquéfié

MCR : salle de contrôle
des trains

LCR : salle de contrôle
de stockage

CCR : salle de contrôle de
des camions

JCR : salle de contrôle
de chargement
bateaux

HP : haute pression

BP : basse pression

BOG : section de
reliquéfaction
des vapeurs

R_i : rayon interne du bac (m)

Q : quantité de chaleur (W)

q_{cond} : densité de flux de chaleur (W/m^2)

Introduction générale :

Le gaz de pétrole liquéfié ou le GPL dont l'Algérie est parmi les plus grands exportateurs dans le monde, constitue l'une des priorités des plans de développement et de la politique énergétique de SONATRACH.

Vu à l'énorme demande du GPL sur le marché national et international et vu à la charge importante qui arrive des champs gaziers et pétroliers, SONATRACH dispose d'importantes installations de production, séparation et de transport des GPL, ce qui permet de les valoriser et de les commercialiser aussi bien sur le marché national et international. Mais, il serait toujours indispensable d'opter pour une exploitation optimale de ces capacités installées, ce qui sera bénéfique sur le plan économique. Ceci nous a amené à effectuer une étude dans ce contexte.

Le complexe GP1Z dispose d'un bac de stockage à une capacité de 76053 m³ de propane commercial. En raison des conditions cryogéniques requises pour son stockage, la chaleur absorbée par le réservoir ne peut pas être évitée où le processus d'évaporation du propane au sein du bac est lié principalement à cette chaleur. Ce phénomène, qui est aussi appelé Boil-off, se traduit par le GPL chauffé qui se vaporise lorsqu'il atteint son point d'ébullition.

L'objectif de ce travail est de déterminer le taux d'évaporation de propane stocké dans le bac T0001 du complexe GP1Z et étudier sa performance. Notre travail a été composé de sept chapitres :

Chapitre 1 : parle des généralités sur le gaz de pétrole liquéfié.

Chapitre 2 : présentation des différents modes de stockage des gaz liquéfiés.

Chapitre 3 : description générale du complexe GP1Z et les différents procédés de liquéfaction du gaz de pétrole.

Chapitre 4 : rappelle des notions théoriques sur le transfert de chaleur

Chapitre 5 : paramètres de fonctionnement et description générale de la problématique.

Chapitre 6 : calcul analytique de taux d'évaporation de propane au sein du bac de stockage dans les trois cas réception, repos, et expédition.

Chapitre 7 : simulation du transfert de la chaleur à travers la paroi latérale du bac dans le cas du bac en repos avec un logiciel Ansys thermique transitoire et interprétation des résultats.

En fin, on termine ce travail par une conclusion générale.

Chapitre I

1 Généralités sur le GPL

1.1 Définition de GPL :

Le GPL est un mélange gazeux composé principalement de butane et de propane, ainsi que d'autres composés en proportions variables, à une température ambiante et à une pression atmosphérique. Il s'agit d'un hydrocarbure, c'est-à-dire qu'il est composé de carbone et d'hydrogène. Le tableau ci-dessous présente un exemple de la composition d'un mélange 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	0.01

Tableau 1-1 : Composition d'un exemple de GPL

La composition chimique du GPL est variable selon les normes et son utilisation dans différents pays. Il peut contenir du propylène, du butène et un faible pourcentage de méthane, d'éthylène et de pentane.

1.2 Les sources de GPL :

Le gaz de pétrole liquéfié est principalement produit :

- A partir du pétrole brut dans les raffineries lors du processus de distillation, ou pendant le craquage thermique ou le reformage catalytique des produits pour la production d'essence.
- Lors des opérations de dégazolinage dans les stations de traitement et de séparation du gaz naturel, qui visent à récupérer et séparer les condensats (propane, butane, essence légère, etc.).
- Dans les unités de liquéfaction par récupération directe des gaz dans les champs gaziers et pétroliers.

1.3 Caractéristiques générales des GPL :

○ La formule chimique

Les gaz propane et 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} .

○ Odeur :

Le GPL n'a aucune odeur à l'état naturel, mais on ajoute des odorants qui sont des composés sulfurés tels que le déthylmercaptan ou le diméthylsulfide, cela est pour des raisons de sécurité et afin de faciliter la détection des fuites.

○ Tension de vapeur :

La tension de vapeur du GPL est de 8 bars pour le propane et 2 bars pour le butane, cela correspondant à une température de 20°C

○ 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

○ Densité :

A conditions normales de température et de pression, le GPL est plus lourd que l'air. Cependant, sa densité diminue avec l'augmentation de la température. Par exemple, à une température de 38°C, sa densité est égale à 0,534.

○ 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).

○ 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)

○ 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 n'a pas de propriété de lubrification et cet effet doit être pris en considération lors de la conception des équipements du GPL les échangeurs, les pompes et compresseurs.
- Le GPL n'est pas toxique, mais il présente un léger pouvoir anesthésiant en cas où il est inhalé longuement.
- Le poids spécifique de GPL est environ la moitié que celui de l'eau.
- Le GPL n'est pas corrosif et cela pour des différents matériaux.
- Etat gazeux à température ambiante.

1.4 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 :

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.

Maison :

Le GPL est largement utilisé comme source d'énergie pour la cuisine, car il est facilement disponible et offre une combustion propre et efficace. Il est notamment utilisé dans les cuisinières à gaz, qui sont équipées de brûleurs contrôlables pour contrôler la température de cuisson. Grâce à leurs capacités de chauffer rapidement et maintenir la température constante, de nombreux consommateurs préfèrent utiliser des fours et des cuisinières qui fonctionnent au GPL (butane ou propane) plutôt que ceux qui utilisent des combustibles locaux tels que le bois, le charbon, les résidus de récolte.



Figure 1-1 : Utilisation de GPL dans la cuisine

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 1-2 : Utilisation de GPL comme carburant automobile

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.

Chauffage :

Dans plusieurs pays, le GPL est considéré comme une source d'énergie fiable en raison de sa variété d'applications telles que le chauffage central, la production d'eau chaude et l'alimentation des chaudières. Un avantage supplémentaire est que les entreprises qui fournissent le GPL garantissent qu'il n'y aura pas de rupture ou de fluctuations d'alimentation en énergie.



Figure 1-3 : Utilisation de GPL pour le chauffage

Climatisation et réfrigération :

Dans les deux cas, la détente de GPL absorbe la chaleur de l'environnement pour s'évaporer et créer du froid. Alternativement, un moteur fonctionnant au GPL peut entraîner un compresseur qui comprime le gaz GPL.



Figure 1-4 : Le GPL dans la climatisation

Autres utilisations :

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

- Utilisation dans les aérosols.
- Fabrication d'autres sous-produits dérivés.

1.5 Avantages et inconvénients de GPL :

1.5.1 Avantages :

- Le GPL offre une conduite plus souple grâce à un couple moteur disponible même à bas régime. Il perd environ 5% de puissance à haut régime, mais les reprises se font plus facilement.
- Le fonctionnement du moteur est plus silencieux et les vibrations sont diminuées par rapport aux carburants classiques. De plus, la combustion du GPL ne laisse aucun dépôt de calamine et procure au moteur et aux lubrifiants une grande durée de vie.
- La surconsommation de GPL est d'environ 15 à 20% par rapport aux carburants traditionnels, ce qui permet une économie sur l'achat.
- Les émissions d'oxyde de carbone sont réduites en circulation urbaine et les gaz d'échappement sont exempts de poussière, de plomb et de soufre, ce qui répond aux normes internationales de protection de l'environnement.

1.5.2 Inconvénients :

- Le réservoir peut réduire le volume du coffre, ce qui implique de proposer une version du modèle avec un réservoir intégré.
- Le remplissage du cylindre peut entraîner une baisse de puissance maximale.
- Certaines adaptations sont nécessaires pour le moteur dans certains véhicules.
- Il y a un risque d'explosion en cas de fuite de gaz.

Chapitre II

2 Stockage des gaz liquéfiés

2.1 Introduction :

Les constructeurs utilisent des réservoirs de différentes formes et conceptions, conçus pour s'adapter de manière rationnelle et économique aux caractéristiques du produit à stocker. La configuration d'un réservoir dépend de deux impératifs essentiels : la conservation du produit en limitant ou en interdisant les évaporations, et la capacité de la structure à supporter la pression interne générée 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.

2.2 Stockage cryogénique :

Le stockage cryogénique est un mode de stockage dans lequel le produit fini est stocké dans des réservoirs d'un volume allant de 1000 à 100 000 m³, généralement construits en acier de qualité courante ou en béton armé précontraint, avec des couches isolantes utilisant des matériaux résistants aux basses températures.

Ce mode de stockage est utilisé pour les gaz incondensables à température ambiante. La pression de stockage est légèrement supérieure à la pression atmosphérique et la température de stockage est proche de la température d'ébullition du gaz.

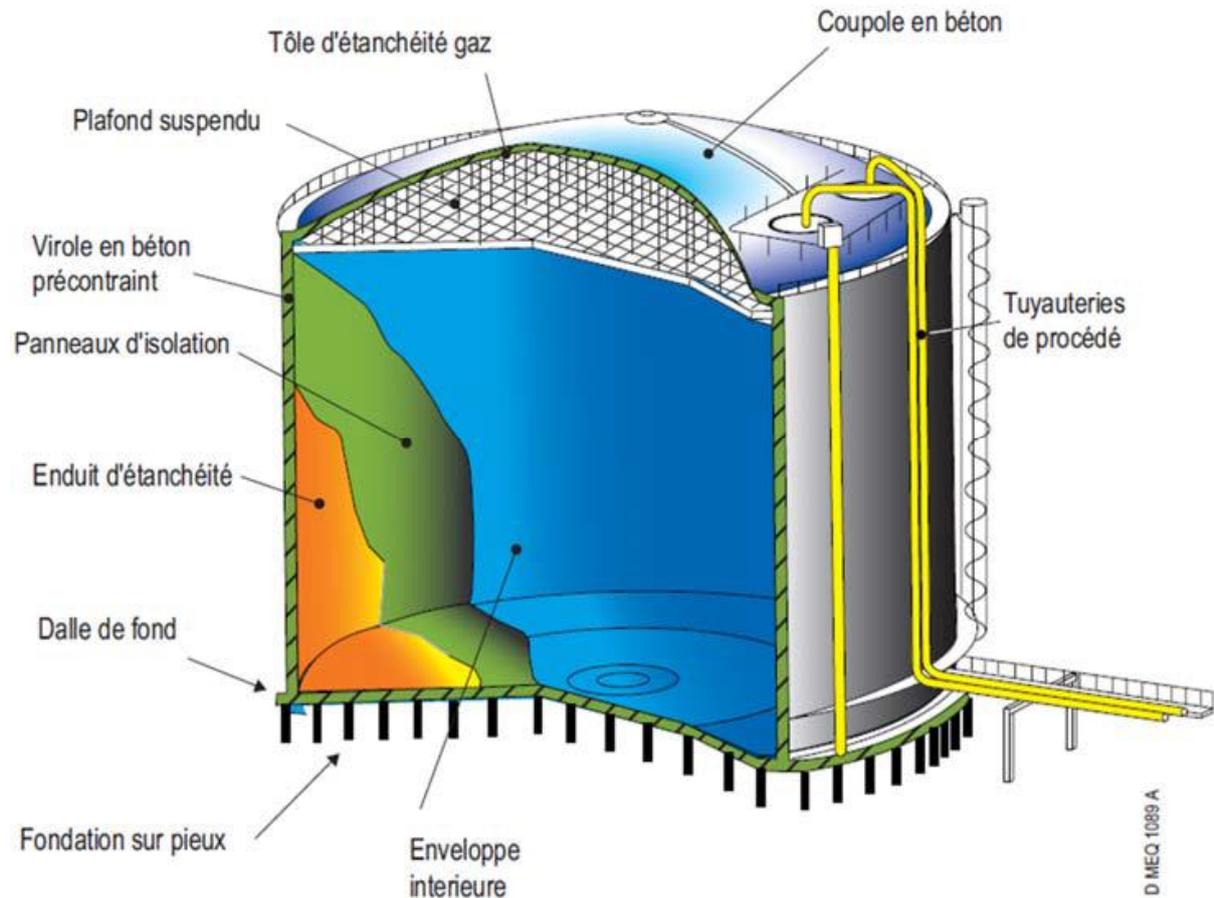


Figure 2-1 : *Eléments constitutifs d'un réservoir cryogénique*

2.3 Stockage aérien sous pression :

C'est le mode de stockage le plus couramment utilisé dans l'industrie du GPL car il permet un stockage économique de très grandes quantités avec un coût d'exploitation minimale. Le stockage est réalisé dans des réservoirs exposés directement à l'air ambiant.

La pression de stockage et la tension de vapeur à une température ambiante dépendent principalement de la nature du produit stocké et des conditions atmosphériques.

Ce mode de stockage concerne :

2.3.1 Les réservoirs cylindriques :

Ils sont installés horizontalement ou verticalement avec une capacité limitée (jusqu'à 3000 m³) et sont très sensibles à la mise sous vide.



Figure 2-2 : Exemple d'un réservoir cylindrique

2.3.2 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 2-3 : Exemple d'un réservoir sphérique

2.4 Stockage sous talus :

Il s'agit d'un mode de stockage souterrain qui peut être réalisé soit avec une forme sphérique, soit avec une forme de cigare, les parois étant recouvertes de couches protectrices pour résister aux effets thermiques et mécaniques. Une épaisseur minimale de 1 mètre de matériaux dense et inerte est utilisée. Pour des raisons de sécurité, toutes les canalisations et les dérivations débouchent généralement en partie haute.

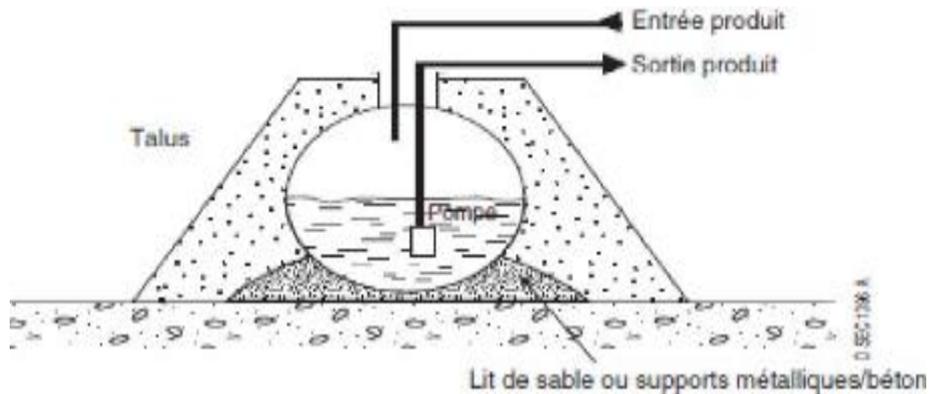


Figure 2-4 : Exemple d'un réservoir sous talus

Chapitre III

3 Description de l'unité GP1Z

3.1 Situation géographique :

Le complexe GP1Z, surnommé JUMBO, fait partie des six complexes de liquéfaction de gaz appartenant à l'entreprise nationale SONATRACH. Il est situé sur le littoral ouest algérien, à 40 km de la ville d'Oran et à 8 km de la ville d'Arzew, entre la centrale thermoélectrique Mers El Hadjajd à l'est et les complexes de GNL à l'ouest, avec une surface de 120 hectares.

3.2 Objet :

Il a été construit dans la zone industrielle d'Arzew dans le but de traiter le mélange GPL brut provenant de plusieurs sources du sud algérien (Hassi Messaoud et Hassi R'Mel) et de produire du butane et du propane commercial pour fournir le marché national et international.

3.3 Histoire :

La construction et le développement du complexe GP1Z ont suivi les étapes suivantes :

-Signature du contrat de construction avec « IHI-C-ITOH JAPAN » le 11/12/1978.

-Ouverture du chantier et démarrage des travaux le 10/10/1980.

-Inauguration officielle le 31/12/1983 avec 4 trains en service.

-Chargement du premier navire de propane réfrigéré le 20/02/1984.

-Extension du complexe en deux phases :

> Phase II le 24/02/1998 (2 trains).

> Phase III le 24/02/2010 (3 trains).



Figure 3-1 : Vue générale de deux trains

3.4 Principales installations :

Les principales installations sont comme suite :

- 22 sphères de stockages de la charge d'alimentation de capacité de 1000 m³ pour chacune.
- 09 trains de traitement de GPL.
- 04 bacs de stockage de propane à basse température avec une capacité de 70000 m³ pour chacun.
- 04 bacs de stockage de butane à basse température avec une capacité de 70000 m³ pour chacun.
- 04 unités de re-liquéfaction des Boil-Of-Gaz.
- 04 sphères de stockage des produits à température ambiante (propane et butane) avec une capacité de 500 m³ pour chacun.
- 01 sphère de stockage gazoline (pentane).
- 02 salles de contrôle : MCR & LCR.
- 02 mini salles de contrôle : - CCR/chargement des camions
-JCR/chargement des bateaux.
- 01 salle de contrôle de sécurité.

- 01 sous-station électrique.
- 06 générateurs assurent l'énergie de secours en cas de coupure d'électricité (01 diesel + 01 turbine à gaz pour chaque phase).
- Unité de démercurisation.
- 02 quais de chargement pour les navires de capacité entre 4000 et 10000 tonnes.
- 01 rampe de chargement pour les camions.
- 01 station de pompage de l'eau de mer pour le système contre incendies.
- 01 système de télésurveillance.



Figure 3-2 : Plan de masse du complexe GP1Z

3.5 Capacité :

A partir d'un traitement GPL algérien en provenance des différentes sources du sud algérien, la production du complexe est de 10.8 M tonnes/an de propane et de butane commercial.

3.6 Description de procédé de production :

3.6.1 Section de stockage d'alimentation :

Le GPL venant de l'extérieur est transporté par des pipelines et stocké dans 22 réservoirs sphériques dans la section de stockage avant de commencer le processus de traitement.

3.6.2 Section de déshydratation :

Elle comprend une unité de déshydratation de la charge et une unité de déshydratation de garde, elle est divisée en 3 sous-sections appelées « déshydrateurs ». L'objectif de cette section est

de réduire la teneur en eau du GPL de 100 ppm à 5 ppm en poids afin d'éviter la formation de givre dans les équipements.

3.6.3 Section de séparation :

Le GPL déshydraté entre dans la section de séparation où la charge est préalablement chauffée jusqu'à une température de 71 °C par trois préchauffeurs (échangeurs de chaleur). Ensuite, le GPL ainsi préchauffé passe directement dans le fractionnateur pour réaliser la séparation en un produit de tête formé de vapeurs de propane et d'éthane. Il est ensuite envoyé dans le dééthaniseur pour extraire l'éthane du produit. Le produit de tête de la colonne est refroidi dans deux condenseurs au propane et le produit du bas est envoyé vers la section de réfrigération. Le produit de fond (pentane et butane) passe également dans le dépentaniseur, de même que le propane. Ces produits en bas de la colonne sont ensuite envoyés vers les sphères de stockage à température ambiante, tandis que le produit de tête est envoyé vers la section de réfrigération.

3.6.4 Section de réfrigération :

Cette section est conçue pour refroidir les produits finis à leurs températures de stockage (-38 °C à -41 °C pour le C3 et -5 °C à -10 °C pour le C4). Le refroidissement se fait à l'aide de trois échangeurs suivant un cycle fermé formant une boucle de réfrigération, en utilisant du propane pur comme fluide réfrigérant. Ensuite, les produits finis sont acheminés par canalisation vers les bacs de stockage.

3.6.5 Section de l'huile chaude :

La section de fluide caloporteur est utilisée comme source de chaleur pour le rebouilleur des colonnes de fractionnement et pour le troisième préchauffeur de la charge GPL. Le circuit d'huile forme une boucle fermée, dont les pompes en circulation aspirent l'huile du ballon d'expansion, puis la refoulent dans le four.

3.6.6 Section des utilités :

C'est une section chargée de la fourniture des différentes énergies nécessaires pour le fonctionnement de l'usine tel que :

- ✓ Production d'eau distillée.
- ✓ Production de vapeur d'eau.
- ✓ Production de d'air comprimé.
- ✓ Alimentation en carburant diesel.
- ✓ Alimentation en méthanol.
- ✓ Alimentation en gaz naturel.
- ✓ Alimentation en azote.

3.6.7 Section de stockage des produits :

• Stockage à température ambiante :

Prévu pour la vente et la commercialisation des gaz à l'échelle nationale, le chargement des camions se fait à partir de quatre sphères d'une capacité de 500 m³ chacune dans lesquelles le propane et le butane sont stockés sous pression et à température ambiante.

• **Stockage à basse température (cryogénique) :**

Les gaz réfrigérés sont transportés par canalisation vers les bacs où ils seront stockés dans des conditions de basse température, avec pour objectif de stocker un produit maximal dans un volume minimal. La capacité de chaque bac est de 70 000 m³. Ils sont équipés de pompes immergées pour la circulation de gaz et le chargement des navires.



Figure 3-3 : Vue générale des bacs de stockage

3.7 Section BOG :

La section de reliquéfaction des vapeurs (BOG) a pour but de contrôler la pression dans les réservoirs pendant le stockage et les opérations de chargement en récupérant les vapeurs excédentaires, en les comprimant pour qu'elles puissent être reliquéfiées sous forme de condensats réfrigérés, puis les réinjecter dans les bacs.

3.8 Section de torche HP et BP :

Pour des raisons de sécurité et pour éviter les incendies, tous les gaz non brûlés passent par des ballons appelés BLOWDOWN. Les gaz échappés ou expulsés par les soupapes de sécurité passent dans les ballons pour être préchauffés et dirigés vers trois torches haute pression (HP) ou deux torches basse pression (BP).

3.9 Section de chargement des produits finaux :

○ **Chargement par navires :**

Le complexe dispose de deux jetées D1 et M6 pour le chargement des bateaux à basse température ayant une capacité de :

- M6 : 10000 m³/h
- D1 : 4000 m³/h

○ **Chargement par camions citernes :**

Elle s'occupe de chargement des camions au niveau de la rompe de chargement dont les clients sont NAFTAL et des opérateurs privés. Cela permet de fournir le marché national de butane et du propane commercialisé.

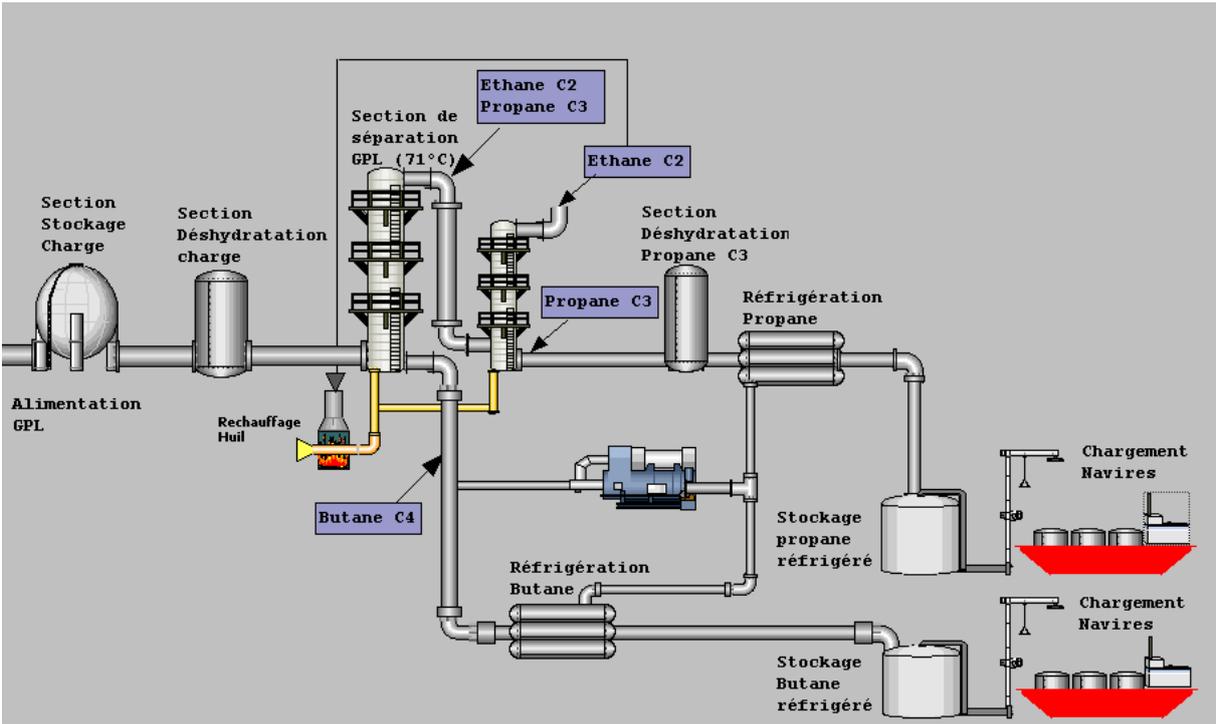


Figure 3-4 : Procédés de production dans le complexe GP1Z

Chapitre IV

4 Transfert de chaleur

4.1 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.

4.2 Les trois modes de transfert de chaleur

4.2.1 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 milieux 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 :

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

Ou sous forme algébrique :

$$\varphi = -\lambda S (\partial T / \partial x)$$

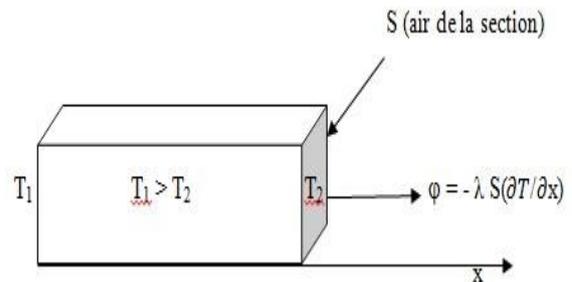


Figure 4-1 : schéma de transfert de chaleur conductif

4.2.2 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 :

4.2.2.1 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.

4.2.2.2 Convection forcée :

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

Expression des flux d'énergie

Fluide à T_∞

$$\phi = h S (T_p - T_\infty)$$

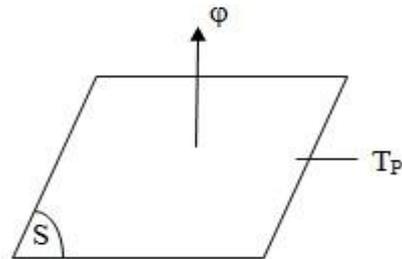


Figure 4-2 : schéma de transfert de chaleur convectif

4.3 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_∞

$$\phi = \sigma \epsilon_p S (T_p^4 - T_\infty^4)$$

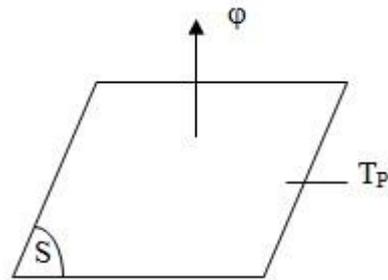


Figure 4-3 : schéma de transfert de chaleur radiatif

4.4 Etude de cas : Transfert de chaleur par conduction en régime permanent

4.4.1 Transfert unidirectionnel

4.4.1.1 Mure 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 :

$$\Phi_x = \Phi_{x+dx} \rightarrow -\lambda S \left(\frac{dT}{dx} \right)_{x=0} = -\lambda S \left(\frac{dT}{dx} \right)_{x+dx} \dots (1)$$

D'où

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

Avec les conditions aux limites :

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

D'où :

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

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 la forme :

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

4.4.1.2 Mur multicouches :

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

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

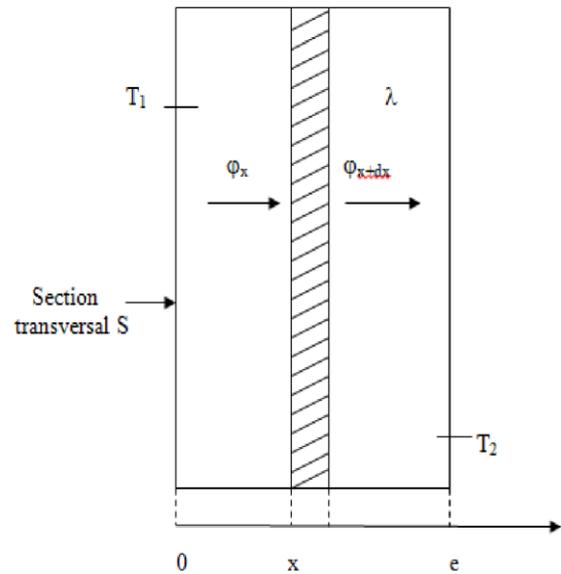


Figure 4-4 : Bilan thermique élémentaire sur un mur simple

D'où :

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

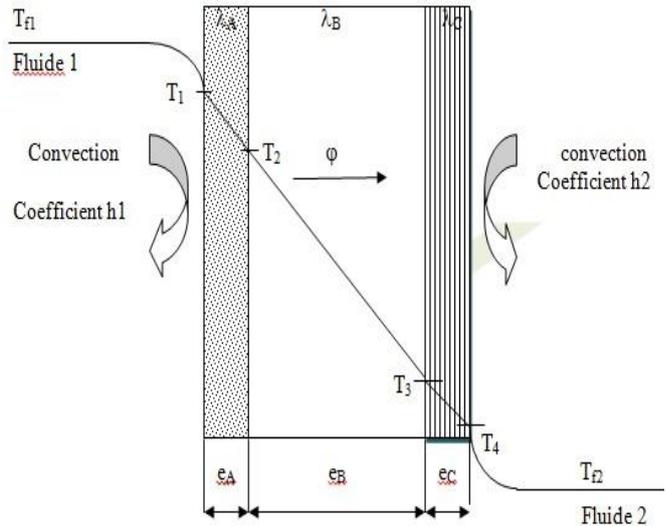


Figure 4-5 : Schéma de flux et température dans un mur multicouche

4.4.1.3 Cylindre creux long (tube)

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

$$\Phi_r = \Phi_{r+dr}, \text{ avec } \Phi = -\lambda 2\pi r L \left(\frac{dT}{dr}\right)_r$$

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

Soit :

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

D'où :

$$r \left(\frac{dT}{dr}\right) = c$$

Avec les conditions aux limites :

$$T(r_1) = T_1 \text{ et } T(r_2) = T_2$$

D'où :

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

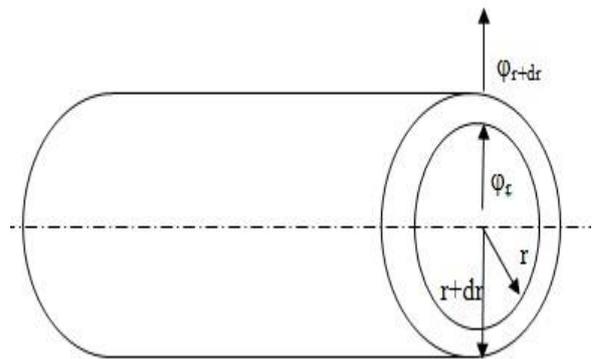


Figure 4-6 : Schéma du transfert de chaleur dans un cylindre creux

Et par application de la relation $\Phi = -\lambda 2\pi r L \left(\frac{dT}{dr}\right)$ on obtient :

$$\varphi = \frac{2\pi\lambda L(T_1 - T_2)}{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)}$$

4.4.1.4 Cylindre creux multicouche :

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

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

D'où :

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

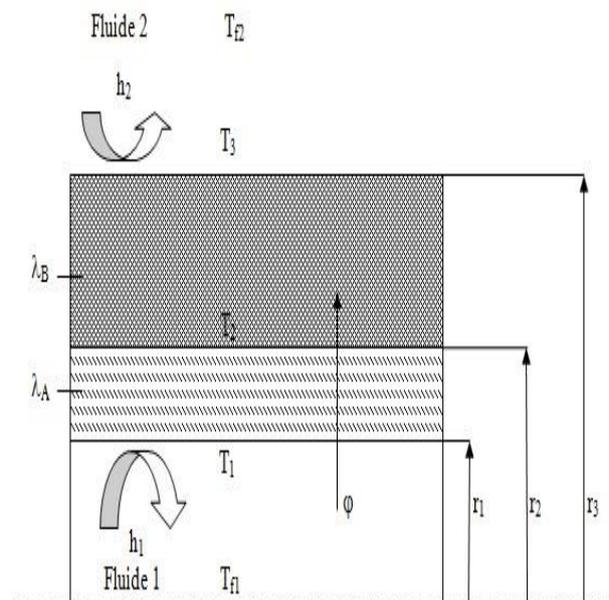


Figure 4-7 : Schéma du transfert de chaleur dans un cylindre creux multicouche

Chapitre V

5 Paramètres de fonctionnement et problématique

5.1 Introduction :

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 5-1 : Vue générale de bac de stockage de propane T0001

5.2 Conditions de fonctionnement :

5.2.1 La pression :

La pression de service de bac est résumée comme suite :

Pression (mmH2O)	Action
-50	Vannes casses vides ouvertes
50	Injection de gaz naturel
100	Compresseurs BOG déclenchés
300 à 800	Fonctionnement normal
950	Excès de gaz à la torche
1000	Soupapes de sureté ouvertes

Tableau 5-1 : Pression de service du bac T0001

5.2.2 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.

Pression de service mmH2O	50	100	300	800	950	1000
Température de service °C	-44.4	-44.3	-44.1	-42.9	-42.4	-42.3

Tableau 5-2 : Pression et température de fonctionnement du bac T0001

5.3 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.

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

	Débit	Température
Entrée	Max 245 (T/hr)	Min -44 °C
Sortie	5000 (m³/hr)	-44 °C

Tableau 5-3 : Débit et température d'entrée et de sortie du bac T0001

5.5 Propriétés de produit :

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

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

Tableau 5-4 : Caractéristique du produit stocké

5.6 Structure du bac T0001 :

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

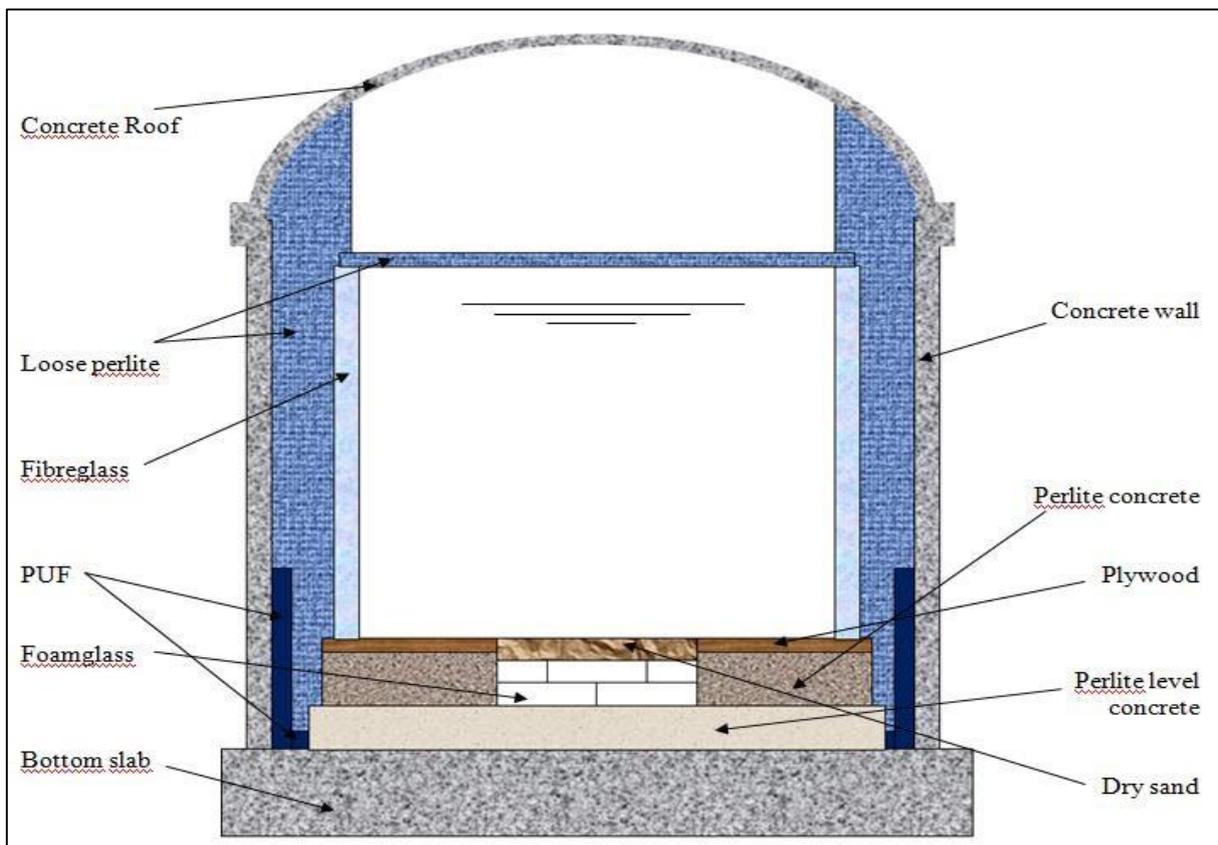


Figure 5-2 : Structure du bac T0001

5.7 Matériaux de construction du bac T0001 :

Pour assurer une meilleure isolation pour le bac et afin de réduire le flux de chaleur pénétré au sein du liquide, le bac a été construit avec plusieurs matériaux et différentes couches et épaisseur.

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	

Tableau 5-5 : Caractéristiques des matériaux de construction du bac T0001

5.8 Le problème d'évaporation :

L'évaporation des gaz, ou "boil-off", est un phénomène majeur dans l'industrie des hydrocarbures, notamment dans les bacs de stockage de propane. Pour minimiser cette évaporation et limiter les pertes de propane stocké, des précautions particulières doivent être prises. En effet, cette perte peut modifier la qualité du propane et avoir un impact sur la sécurité du bac. Les infiltrations thermiques à travers les parois du bac de stockage sont la principale cause de ce phénomène, ce qui rend nécessaire la détermination du taux d'évaporation résultant par des calculs appropriés. Maîtriser ce phénomène est donc d'une importance capitale pour assurer la rentabilité, la qualité et la sécurité du stockage de propane.

Chapitre VI

6 Détermination de taux d'évaporation

6.1 Introduction :

Le constructeur du bac de stockage T0001 a évalué l'ensemble des pertes dues aux infiltrations thermiques à environ 0.05% du volume par jour pour une température de stockage égale à -51°C pour les pires et les plus critiques conditions climatiques.

La variation de température durant la journée est l'origine de phénomène d'évaporation du liquide dans le bac de stockage. La différence de la température entre le milieu extérieur et l'intérieure du bac génère un flux de chaleur qui pénètre au sein du bac, ce qui provoque une augmentation de la température de la surface liquide et par la suite la tension de vapeur. Alors, elle devient supérieure à la pression partielle du constituant de la phase gazeuse ce qui provoque l'évaporation du liquide. L'augmentation de la température de la phase gazeuse provoque aussi une augmentation de la pression totale du bac.

Les variations des températures de la surface du liquide et de la phase gazeuse ne sont pas identiques. D'ailleurs, les températures au sein des deux phases ne sont pas homogènes, ce qui fait apparaître des courants de convection entre les deux phases et qui sont particulièrement intense à cause des grandes dimensions du bac.

6.2 Estimation des pertes par évaporation :

L'estimation des pertes par évaporation est réalisée en utilisant des relations empiriques, qui fournissent une approximation suffisante pour les calculs. Cependant, pour obtenir une précision plus rigoureuse, il est nécessaire de déterminer les températures à travers les couches isolantes, afin de calculer le flux de chaleur entrant dans le bac.

En raison de la non-homogénéité de la température dans le réservoir et des conditions climatiques externes, la quantité exacte de vapeur formée à l'intérieur du bac de stockage est difficile à déterminer avec précision, ce qui rend les calculs seulement estimatifs.

Le bac T0001 fonctionne selon trois régimes différents : la réception, le repos et l'expédition (chargement des navires).

6.3 Calcul de taux d'évaporation :

6.3.1 1^{er} cas : bac en réception :

Pour calculer le taux d'évaporation du propane durant l'opération de la réception, on doit d'abord déterminer le volume du liquide entré dans le bac à partir les indicateurs de niveau dans la salle de contrôle aussi à partir des débits de sorti des trains indiqués par les débitmètres, puis en fait la différence entre les deux volumes et on calcule le taux d'évaporation du propane pendant la réception.

6.3.1.1 Calcul de volume du liquide en cours de réception à partir du niveau de bac :

Paramètres	Début de réception	Fin de réception
Date	25/01/2023	28/01/2023
Heure	17 : 52 : 01	06 : 18 : 30
Niveau (m)	5,41	21,60
Δt (s)	217589	

Tableau 6-1 : Les paramètres de réception du bac T0001

$$V = S \times h = \pi \times (d^2/4) \times h$$

Début de réception :

$$V_A = 3,14 \times ((55,63)^2/4) \times 5,41$$

$$V_A = 13142,71 \text{ m}^3$$

Fin de réception :

$$V_B = 3,14 \times ((55,63)^2/4) \times 21,60$$

$$V_B = 52473,68 \text{ m}^3$$

Donc le volume entré dans le bac est :

$$\begin{aligned} V_I &= V_B - V_A \\ &= 52473,68 - 13142,71 \\ V_I &= 39330,97 \text{ m}^3 \end{aligned}$$

6.3.1.2 Calcul de volume du liquide en cours de réception à partir des débits de sorti des trains :

Trains	Fractionneurs	Deéthaniseurs	Débits de sorti (m ³ /h)
Train 100	En service	En service	107,88
Train 200	En service	En arrêt	101,54
Train 300	En arrêt	En arrêt	0
Train 400	En service	En service	95,10
Train 500	En service	En service	100,01
Train 600	En service	En arrêt	106,60

Chapitre VI : Détermination de taux d'évaporation

Train 700	En service	En service	101,05
Train 800	En arrêt	En arrêt	0
Train 900	En service	En arrêt	90,22
Total	07 en service 02 en arrêt	04 en service 05 en arrêt	702,40

Tableau 6-2 : Paramètres et débits de sorti des trains

La réception du propane dans le bac T0001 se fait avec un débit de 702,40 m³/h durant une période de 217589 s.

On a la relation entre le débit et le volume :

$$\text{Débit} = \text{Volume} / \text{Temps} \quad \longrightarrow \quad \text{Volume} = \text{Débit} \times \text{Temps}$$

Alors :

$$V_2 = 702,40 \times (217589/3600)$$

$$V_2 = 42454,03 \text{ m}^3$$

Donc le volume de liquide perdu durant l'opération de réception est :

$$\begin{aligned} \Delta V &= V_2 - V_1 \\ &= 42454,03 - 39330,97 \\ \Delta V &= 3123,06 \text{ m}^3 \end{aligned}$$

$$\left. \begin{array}{l} V_{\text{Total}} \longrightarrow 100 \% \\ \Delta V \longrightarrow \% \text{ vol} \end{array} \right\} \quad \boxed{\% \text{vol} = 4,11}$$

Alors le taux d'évaporation sera :

$$\tau = \frac{\% \text{volume évaporé}}{\text{temps(jours)}} = \frac{4,11}{2,52} = 1,63$$

$$\boxed{\tau = 1,63 \% \text{ (vol/jour)}}$$

6.3.2 2^{eme} cas : bac en repos :

Hypothèses :

Dans ce cas, pour calculer le taux d'évaporation dans le bac on suppose que :

- Ces calculs ont été effectués pour le cas des conditions environnementales critiques.
- Le taux d'évaporation est calculé pour le cas des pires conditions environnementales.
- Les pompes de chargement, circulation et réception ainsi toutes les conduites n'ont pas été retenues dans les calculs.
- Le propane stocké n'est pas en mouvement dont toutes les lignes raccordées au bac doivent être fermées (il n'y a ni chargement, ni réception).
- Le bac est rempli.
- La pression doit être constante et stable que possible.

Le taux d'évaporation du propane dans le bac dû aux échanges thermiques avec le milieu extérieur s'établit avec la formule suivante :

$$\tau \text{ (vol/jour)} = Q_t \times 100 / (V * \rho * L)$$

Sachant que la surface d'échange est partagée en trois surfaces :

- Le toit du bac
- La paroi latérale du bac
- Le fond du bac

6.3.2.1 La quantité de chaleur transférée à travers la surface du fond :

Dans cette surface, on a un flux de chaleur par conduction exprimé par la formule suivante :

$$Q = U \times S \times \Delta T$$

Avec :

$$U = (\sum e/\lambda)^{-1} \quad ; \quad \Delta T = T_0 - T_1$$

T_0 : température ambiante 65 °C (durant la journée) et 38 °C

(Durant la nuit et pour les surfaces non ensoleillées)

T_1 : température moyenne de liquide = -44 °C

Chapitre VI : Détermination de taux d'évaporation

La surface du fond se divise en trois parties à cause des structures différentes dans chaque partie, par conséquent la conductivité thermique sera différente et la quantité de chaleur libérée et le flux de chaleur transféré seront aussi différents dans chaque partie.

➤ Flux thermique transféré de la surface A :

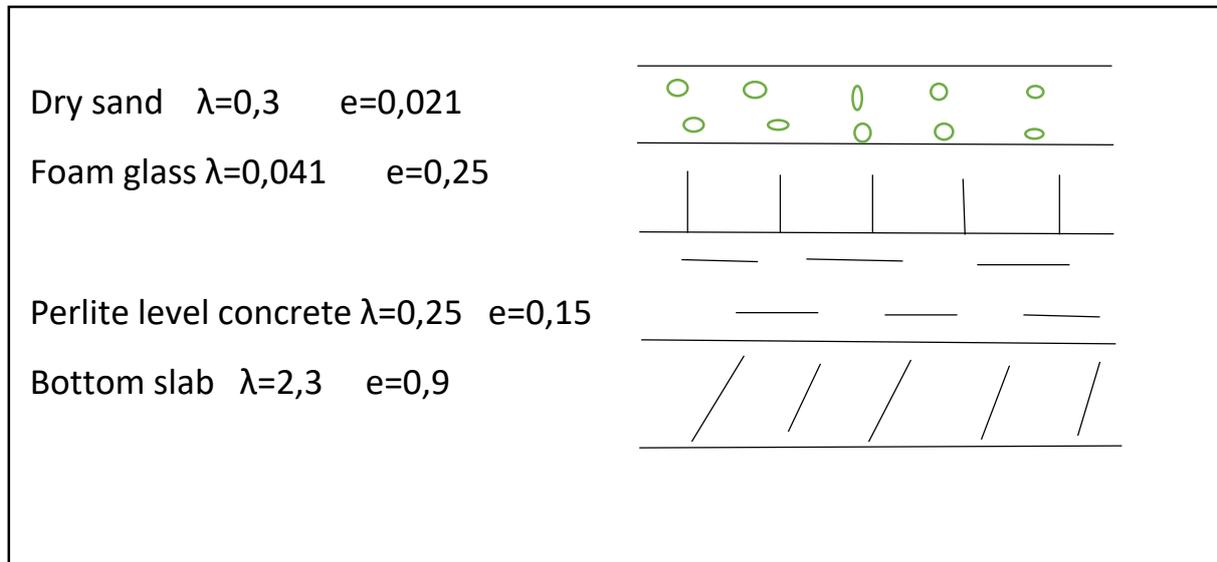


Figure 6-1 : Schéma de la surface A du fond du bac

$$U_A = (0,055/0,652 + 0,25/0,041 + 0,150/0,25 + 0,9/2,3)^{-1}$$

$$U_A = 0,1395 \text{ W/m}^2.\text{K}$$

$$Q_A = 0,1395 \times \pi \times 27,015^2 \times (38+44)$$

$$Q_A = 26213,66 \text{ W}$$

➤ Flux thermique transféré de la surface B :

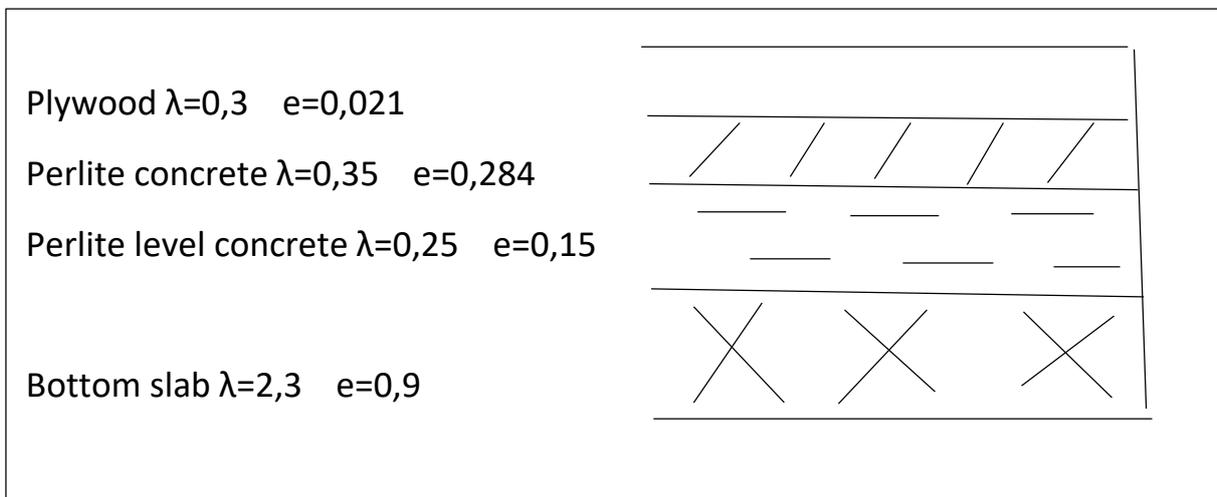


Figure 6-2 : Schéma de la surface B de fond du bac

$$U_B = (0,021/0,3 + 0,284/0,35 + 0,15/0,25 + 0,9/2,3)^{-1}$$

$$U_B = 0,5340 \text{ W/m}^2.\text{K}$$

$$Q_B = 0,5340 \times \pi \times (28,115^2 - 27,015^2) \times (38+44)$$

$$Q_B = 8338,07 \text{ W}$$

➤ **Flux thermique transféré de la surface C :**

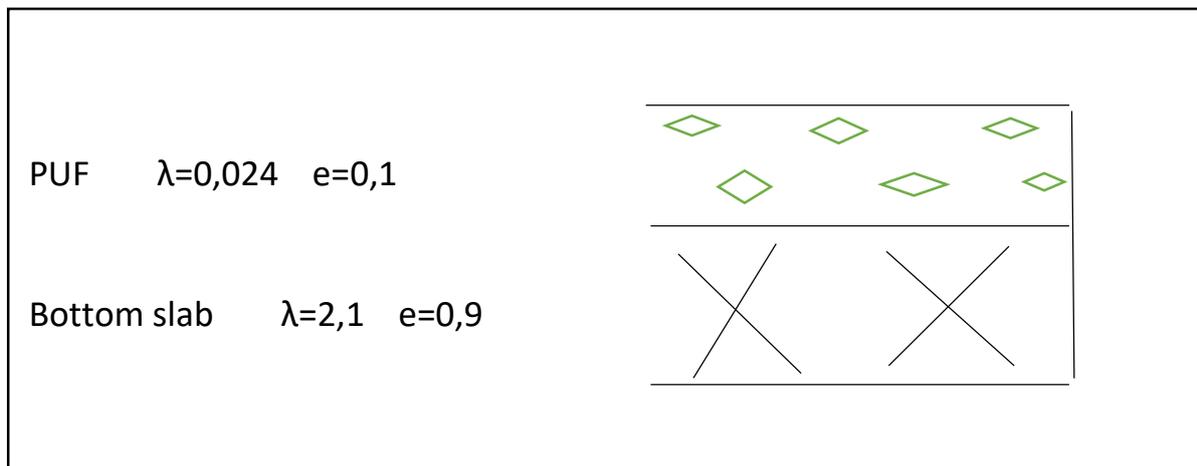


Figure 6-3 : Schéma de la surface C de fond du bac

$$U_C = (0,1/0,024 + 0,9/2,3)^{-1}$$

$$U_C = 0,2193 \text{ W/m}^2.\text{K}$$

$$Q_C = 0,2193 \times \pi \times (28,815^2 - 28,115^2) \times (38+44)$$

$$Q_C = 2250,20 \text{ W}$$

Pendant 24 heures, la quantité de chaleur transférée au liquide dans le bac à travers toute la surface du fond est :

$$Q_I = Q_A + Q_B + Q_C$$

$$Q_1 = 26213,66 + 8338,07 + 2250,20$$

$$Q_1 = 36801,93 \text{ W}$$

6.3.2.2 La quantité de chaleur transférée au liquide à travers la paroi latérale :

La surface latérale du bac est de forme cylindrique et elle est composée de multiples couches et des sections distinctes. Par conséquent, le flux de chaleur s'effectue par conduction et se transmet au liquide en prenant en considération la conductivité thermique de chaque matériau.

L'expression de flux à ce stade est :

$$Q_{\text{surface latérale}} = U \times H \times (T_{\text{so}} - T_{\text{si}})$$

Sachant que :

$$U = 2 \times \pi \times [\sum 1/\lambda \times \ln (R_o/R_i)]^{-1}$$

➤ Flux de chaleur transféré à travers la surface A :

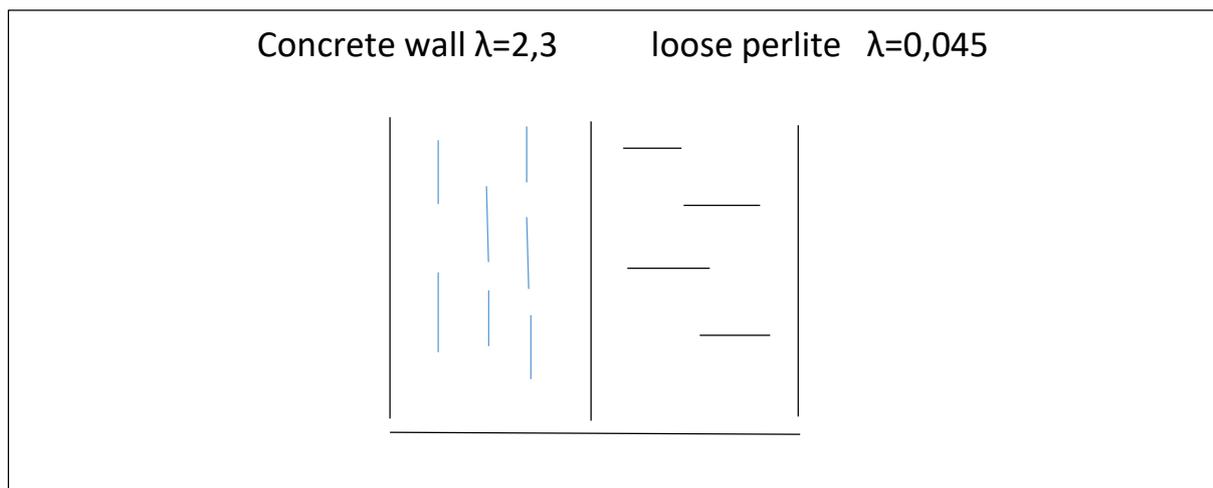


Figure 6-4 : Schéma de la surface A de latéral du bac

- Surface ensoleillée durant la période de la journée :

$$U_{A1} = 2 \times \pi \times [1/2,3 \ln (29,415/28,815) + 1/0,045 \ln (28,815/27,815)]^{-1}$$

$$U_{A1} = 7,9147 \text{ W/m.K}$$

$$Q_{A1} = [7,9147 \times (1,73/2) \times (65+44) \times (12\text{h}/24\text{h})] \times 1/2$$

$$Q_{A1} = 186,56 \text{ W}$$

- **Surface non ensoleillée durant la période de la journée :**

$$U_{A2} = 2 \times \pi \times [1/2,3 \ln (29,415/28,815) + 1/0,042 \ln (28,815/27,815)]^{-1}$$

$$U_{A2} = 7,393 \text{ W/m.K}$$

$$Q_{A2} = [7,393 \times (1,73/2) \times (38+44) \times (12\text{h}/24\text{h})] \times 1/2$$

$$Q_{A2} = 131,10 \text{ W}$$

- **Durant la période de nuit :**

$$U_{A2} = 2 \times \pi \times [1/2,3 \ln (29,415/28,815) + 1/0,042 \ln (28,815/27,815)]^{-1}$$

$$U_{A2} = 7,393 \text{ W/m.K}$$

$$Q_{A2} = 7,393 \times (1,73/2) \times (38+44) \times (12\text{h}/24\text{h})$$

$$Q_{A2} = 262,19 \text{ W}$$

La quantité de chaleur totale transférée au liquide à travers toute la surface A durant 24 heures est :

$$Q_A = Q_{A1} + Q_{A2} + Q_{A3}$$

$$Q_A = 186,56 + 131,10 + 262,19$$

$$Q_A = 579,85 \text{ W}$$

➤ **Flux thermique transféré à travers la surface B :**



Figure 6-5 : Schéma de la surface B de latéral du bac

- **Surface ensoleillée durant la période de la journée :**

$$U_{B1} = 2 \times \pi \times [1/2,3 \ln (29,415/82,815) + 1/0,045 \ln (28,815/27,935) + 1/0,042 \ln (27,935/27,815)]^{-1}$$

$$U_{B1} = 7,848 \text{ W/m.K}$$

$$Q_{B1} = 7,848 \times (27,27/2) \times (65+44) \times (12\text{h}/24\text{h})$$

$$Q_{B1} = 5831,91 \text{ W}$$

- **Surface non ensoleillée durant la période de la journée :**

$$U_{B2} = 2 \times \pi \times [1/2,3 \ln (29,415/82,815) + 1/0,042 \ln (28,815/27,935) + 1/0,042 \ln (27,935/27,815)]^{-1}$$

$$U_{B2} = 7,393 \text{ W/m.K}$$

$$Q_{B2} = 7,393 \times (27,27/2) \times (38+44) \times (12\text{h}/24\text{h})$$

$$Q_{B2} = 4132,95 \text{ W}$$

- **Durant la période de la nuit :**

$$U_{B3} = 2 \times \pi \times [1/2,3 \ln (29,415/82,815) + 1/0,042 \ln (28,815/27,935) + 1/0,042 \ln (27,935/27,815)]^{-1}$$

$$U_{B3} = 7,393 \text{ W/m.K}$$

$$Q_{B3} = 7,393 \times 27,27 \times (38+44) \times (12\text{h}/24\text{h})$$

$$Q_{B3} = 8265,89 \text{ W}$$

La quantité de chaleur totale transférée au liquide à travers toute la surface B pendant 24 heures est :

$$Q_B = Q_{B1} + Q_{B2} + Q_{B3}$$

$$Q_B = 5831,91 + 4132,95 + 8265,89$$

$$Q_B = 18230,75 \text{ W}$$

➤ **Flux thermique transféré à travers la surface C :**

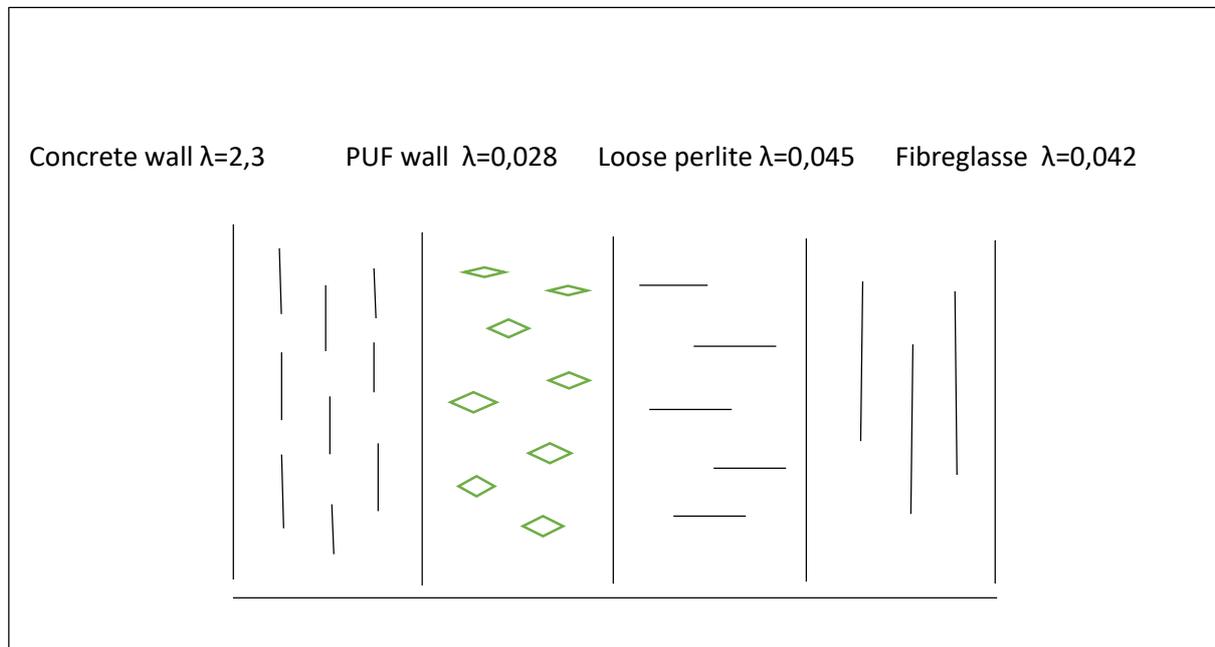


Figure 6-6 : Schéma de la surface C de latéral du bac

• **Surface ensoleillée durant la période de la journée :**

$$U_{C1} = 2 \times \pi \times [1/2,3 \ln (29,415/28,815) + 1/0,028 \ln (28,815/28,715) + 1/0,045 \ln (28,715/27,935) + 1/0,042 \ln (27,935/27,815)]^{-1}$$

$$U_{C1} = 7,413 \text{ W/m.K}$$

$$Q_{C1} = 7,413 \times \frac{(5,00+4,54)/2}{2} \times (65+44) \times (12\text{h}/24 \text{ h})$$

$$Q_{C1} = 963,56 \text{ W}$$

• **Surface non ensoleillée durant la période de la journée :**

$$U_{C2} = 2 \times \pi \times [1/2,3 \ln(29,415/28,815) + 1/0,024 \ln(28,815/28,715) + 1/0,042 \ln(28,715/27,935) + 1/0,042 \ln(27,935/27,815)]^{-1}$$

$$U_{C2} = 6,890 \text{ W/m.K}$$

$$Q_{C2} = 6,890 \times \frac{(5,00+4,54)/2}{2} \times (38+44) \times (12\text{h}/24\text{h})$$

$$Q_{C2} = 673,74 \text{ W}$$

• **Durant la période de la nuit :**

$$U_{C3} = 2 \times \pi \times [1/2,3 \ln (29,415/28,815) + 1/0,024 \ln (28,815/28,715) + 1/0,042 \ln (28,715/27,935) + 1/0,042 \ln(27,935/27,815)]^{-1}$$

$$U_{C3} = 6,890 \text{ W/m.K}$$

$$Q_{C3} = 6,890 \times (5,00+4,54)/2 \times (38+44) \times (12\text{h}/24\text{h})$$

$$Q_{C3} = 1347,48 \text{ W}$$

La quantité de chaleur totale transférée au liquide à travers toute la surface C pendant 24 heures est :

$$Q_C = Q_{C1} + Q_{C2} + Q_{C3}$$

$$Q_C = 963,56 + 673,74 + 1347,48$$

$$Q_C = 2984,78 \text{ W}$$

Ainsi, la quantité de chaleur transférée à travers toute la paroi latérale du bac au liquide durant 24 heures est :

$$Q_2 = Q_A + Q_B + Q_C$$

$$Q_2 = 579,85 + 18230,75 + 2984,78$$

$$Q_2 = 21795,38 \text{ W}$$

6.3.2.3 La quantité de chaleur transférée au liquide à travers le toit :

Le toit de bac est composé de plusieurs couches de différentes natures, et le calcul de flux de chaleur se fait selon les formules suivantes :

$$Q = q \times A$$

Les formules suivantes sont équilibrées dans chaque couche d'isolation du toit :

$$q_{01} = \lambda_{01} \times (t_0 - t_1) / 0,3$$

$$q_{12} = \frac{5,675}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{\varepsilon_2} - 1} \times \left\{ \left(\frac{273+t_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{273+t_2}{100} \right)^4 \right\} + \frac{\lambda_{12}}{4,5505} \times (t_1 - t_2)$$

$$q_{23} = \lambda_{23} \times (t_2 - t_3) / 0,35$$

$$q_{01} = q_{12} = q_{23} = q$$

➤ **Le flux thermique transféré à travers le toit durant la période de la journée :**

$$\lambda_{01} = 2,30 \text{ (concrete)} \quad T_0 = T_{sr1} = 65 \text{ °C}$$

$$\lambda_{12} = 0,023 \text{ (propane)} \quad T_2 = 61,5 \text{ °C}$$

$$\lambda_{23} = 0,041 \text{ (loose perlite)} \quad T_3 = -44 \text{ °C}$$

$$q_{23} = \lambda_{23} \times (t_2 - t_3) / 0,35 = 0,041 \times (61,5 + 44) / 0,35$$

$$q_{23} = 12,36 \text{ W/m}^2$$

$$Q_{31} = q_{23} \times \frac{(2\pi \times 57,93 \times 8,021 + \pi \times 27,815^2)}{2} \times \frac{12h}{24h}$$

$$Q_{31} = 12,36 \times \frac{(2\pi \times 57,93 \times 8,021 + \pi \times 27,815^2)}{2} \times \frac{12h}{24h}$$

$$Q_{31} = 16523,40 \text{ W}$$

➤ **Le flux thermique transféré à travers le toit durant la période de nuit :**

$$\lambda_{01} = 2,30 \text{ (concrete)} \quad T_0 = T_{sr2} = 38 \text{ °C}$$

$$\lambda_{12} = 0,022 \text{ (propane)} \quad T_2 = 35 \text{ °C}$$

$$\lambda_{23} = 0,040 \text{ (loose perlite)} \quad T_3 = -44 \text{ °C}$$

$$q_{23} = \lambda_{23} \times (t_2 - t_3) / 0,35 = 0,040 \times (35 + 44) / 0,35$$

$$q_{23} = 9,03 \text{ W/m}^2$$

$$Q_{32} = q_{23} \times \frac{(2\pi \times 57,93 \times 8,021 + \pi \times 27,815^2)}{2} \times \frac{12h}{24h}$$

$$Q_{32} = 9,03 \times \frac{(2\pi \times 57,93 \times 8,021 + \pi \times 27,815^2)}{2} \times \frac{12h}{24h}$$

$$Q_{32} = 12071,71 \text{ W}$$

Chapitre VI : Détermination de taux d'évaporation

La quantité de chaleur transférée au liquide à travers toute la surface du toit durant 24 heures est :

$$Q_3 = Q_{31} + Q_{32}$$

$$Q_3 = 16523,40 + 12071,71$$

$$Q_3 = 28595,11 \text{ W}$$

Ainsi, la quantité de chaleur totale transmise au liquide à travers toute la surface du bac pendant 24 heures est :

$$Q_T = Q_1 + Q_2 + Q_3 \times 1,05^*$$

$$= 36801,93 + 21795,38 + 28595,11 \times 1,05$$

$$Q_T = 88622,18 \text{ W}$$

Surface	Quantité de chaleur (W)	
Fond	Q ₁	36801,93
Paroi latérale	Q ₂	21795,38
Toit	Q ₃	28595,11 × 1,05
Total	Q _T = 88622,18	

Tableau 6-3 : Quantité de chaleur totale quotidienne

Alors le taux d'évaporation sera :

$$\tau = \frac{Q_T \times 24}{V \times G \times L} \times 100 = \frac{88622,11 \times 24}{76053 \times 590 \times 118,33} \times 100$$

$$\tau = 0,040 \text{ \%volume/jour} < 0,05 \text{ \%volume/jour}$$

6.3.3 3^{eme} cas : bac en expédition :

Identiquement au cas de réception, on calcule le taux d'évaporation du propane durant l'opération de l'expédition par le débit de la pompe d'expédition et la différence entre des volumes calculés à partir des niveaux de bac indiqués par les capteurs de niveau.

6.3.3.1 Calcul de volume du liquide en cours d'expédition à partir du niveau de bac :

Paramètres	Début de l'expédition	Fin de l'expédition
Date	17/02/2023	17/02/2023
Heure	09 : 02 : 17	22 : 40 : 10
Niveau (m)	23,385	14,805
Δt (s)	49347	

Figure 6-7 : Les paramètres de réception du bac T0001

$$V = S \times h = \pi \times (d^2/4) \times h$$

Début de l'expédition :

$$V_A' = 3,14 \times ((55,63)^2/4) \times 23,385$$

$$V_A' = 56810,05 \text{ m}^3$$

Fin de l'expédition :

$$V_B' = 3,14 \times ((55,63)^2/4) \times 14,805$$

$$V_B' = 35966,34 \text{ m}^3$$

Donc le volume sorti du le bac est :

$$V_1' = V_B - V_A$$

$$= 56810,05 - 35966,34$$

$$V_1' = 20843,7 \text{ m}^3$$

6.3.3.2 Calcul de volume du liquide en cours d'expédition à partir du débit de la pompe d'expédition :

L'expédition de propane du bac T0001 vers le navire se fait par une pompe immergée 1330 m³/h, donc le volume du liquide envoyé pendant une période de 13,71 heures est :

$$\text{Débit} = \text{Volume} \times \text{Temps} \longrightarrow \text{Volume} = \text{Débit} / \text{Temps}$$

Alors :

$$V_2' = 1330 \times 13,71$$

$$V_2' = 18234,3 \text{ m}^3$$

Après la fin de cette opération, enregistre un retour d'un certain volume du liquide constant vers le bac et qui se trouve dans la ligne de chargement. Cette valeur est estimée de :

$$V_3' = 2000 \text{ m}^3$$

Chapitre VI : Détermination de taux d'évaporation

Donc :

$$\begin{aligned}\Delta V &= V_1' - V_2' - V_3' \\ &= 20843,7 - 18234,3 - 2000 \\ \Delta V &= 609,4 \text{ m}^3\end{aligned}$$

$$V_{\text{Total}} \longrightarrow 100 \%$$

$$\Delta V \longrightarrow \% \text{ vol}$$

$\% \text{vol} = 0,8$

Alors le taux d'évaporation sera :

$$\tau = \frac{\% \text{volume évaporé}}{\text{temps(jours)}} = \frac{0,8}{0,57} = 1,4$$

$\tau = 1,4 \text{ \% (vol/jour)}$

Chapitre VII

7 Partie logiciel, résultats et discussion

7.1 Introduction :

Dans ce chapitre, nous allons procéder à l'étude numérique, pour cela on a utilisé un logiciel de simulation Ansys Thermique transitoire 20.2. Ce travail se focalise sur les l'étude des infiltrations thermiques à travers la paroi latérale du bac et la fiabilité des matériaux utilisés dans sa construction dont nous allons voir l'évolution de nombreux paramètres au fils du temps tel que les températures et le flux de chaleur. Par la suite, nous allons changer l'isolant intérieur « perlite » par un autre isolant meilleur et voir les résultats. Après avoir terminé, nous allons suggérer un autre matériau plus efficace et étudier sa fiabilité pour l'isolation de la paroi latérale du bac.

7.2 Présentation de logiciel de calcul :

Ansys Thermique transitoire est un logiciel sous licence commercial, permet de réaliser des simulations 2D ou 3D allant de la construction de maillage jusqu'à la résolution mathématique du problème. Il est largement répandu dans l'industrie (aéronautique, automobile etc...) en raison de son interface graphique puissant et l'abondance de ses options, il permet de réaliser des simulations sur tous types de géométrie complexes.

7.3 Description du problème :

Pour approcher plus à ce problème exposé qui est le transfert de chaleur à travers les surfaces du bac au sein du liquide stocké et qui est responsable de phénomène d'évaporation de propane, nous avons focaliser dans la simulation présente sur les infiltrations thermiques dans la paroi latérale et nous avons négligé le toit et le fond. La paroi du bac a une hauteur de 31,8 m et une isolation thermique d'une épaisseur totale de 2,2 m de différentes couches et matériaux. Le bac est considéré remplis à une température égale à -44 °C avec une température ambiante égale à 65 °C. Dans notre cas, le modèle est résolu dans une coupe 2D du bac.

7.4 Propriétés du liquide et matériaux utilisés :

Le liquide utilisé est le propane sans prendre en considération sa composition et ses propriétés parce qu'ils n'ont pas une influence sur le profil des températures ni de la quantité de chaleur absorbée par le bac.

Les matériaux utilisés ont les propriétés que la figure ci-dessous montre :

Matériaux	Masse volumique (kg/m ³)	Conductivité thermique
Concrete	1,2	2,3
PUF	31,94	0,026
Perlite	137,61	0,043
Fibre de glasse	134,90	0,042

Tableau 7-1 : Propriétés des matériaux utilisés

7.5 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 :

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} + \nabla \cdot (k \nabla T) + Q = \rho c (\frac{\partial T}{\partial t}) + k \nabla^2 T + Q = 0$$

Où :

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

Cette équation est résolue pour obtenir la distribution de température T dans le domaine d'intérêt, en fonction des conditions initiales, des conditions aux limites et des propriétés thermiques du matériau.

Dans ANSYS, cette équation est discrétisée en utilisant la méthode des éléments finis. Le domaine d'étude est subdivisé en éléments finis, et une fonction d'interpolation est utilisée pour approximer la solution à l'intérieur de chaque élément. Les inconnues sont les valeurs de température aux nœuds des éléments finis. En utilisant les propriétés du matériau, les conditions aux limites et les conditions initiales, un système d'équations algébriques est formé, qui est ensuite résolu numériquement pour obtenir les températures aux différents nœuds du maillage.

Une fois les températures calculées, les flux de chaleur peuvent être déterminés à l'aide de 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.

7.6 Conditions aux limites :

Il faut bien définir les conditions aux limites qu'on impose sur les différentes limites de domaine de calcul pour avoir des résultats de simulation plus exacte. Pour notre cas, on a imposé les conditions suivantes :

- Le bac est assumé remplis et en repos.
- Un flux convectif du côté extérieur de la paroi avec un coefficient de convection $h=15 \text{ W/m}^2$ et une température égale à $65 \text{ }^\circ\text{C}$.
- Un flux convectif du côté intérieur de la paroi avec un coefficient de convection $h=100 \text{ W/m}^2$ et une température égale à $-44 \text{ }^\circ\text{C}$.
- Une isolation adiabatique au sommet et au fond de la paroi.

- Une température initiale égale à 65 °C.
- Le rayonnement solaire est négligé.

7.7 La géométrie :

La figure VII.1 décrit la paroi latérale du bac en 2D utilisée dans la présente simulation avec les dimensions réelles, d'une hauteur de 31,8 m et une largeur de 2,2 m. La paroi est composée de 4 couches d'isolation thermique avec des épaisseurs et matériaux différents. La géométrie est effectuée avec l'outil de modélisation Design Modelar dans Ansys.

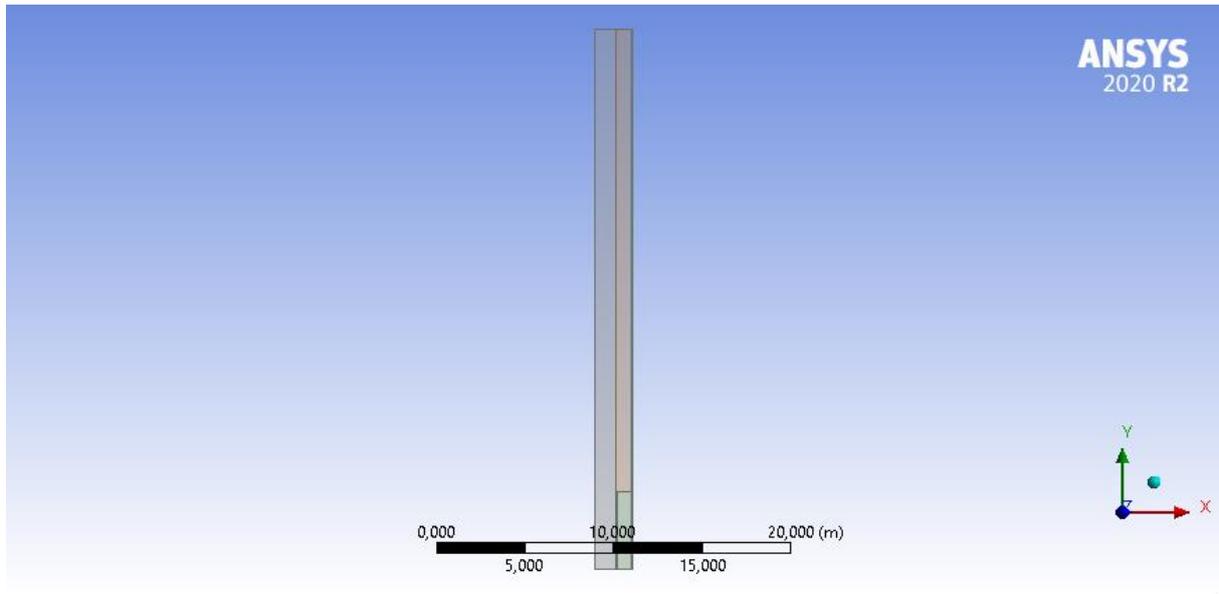


Figure VII.1 : Description de la géométrie utilisée dans la simulation

7.8 Le maillage :

Le maillage est réalisé avec un nombre d'éléments de 30 mm égale à 77380 ou le nombre de nœuds créé égale à 239011. D'après plusieurs études similaires, un nombre de nœuds et d'éléments qui dépasse 50k est suffisant pour permettre de bien cerner le phénomène étudié et obtenir des résultats bien précisés.

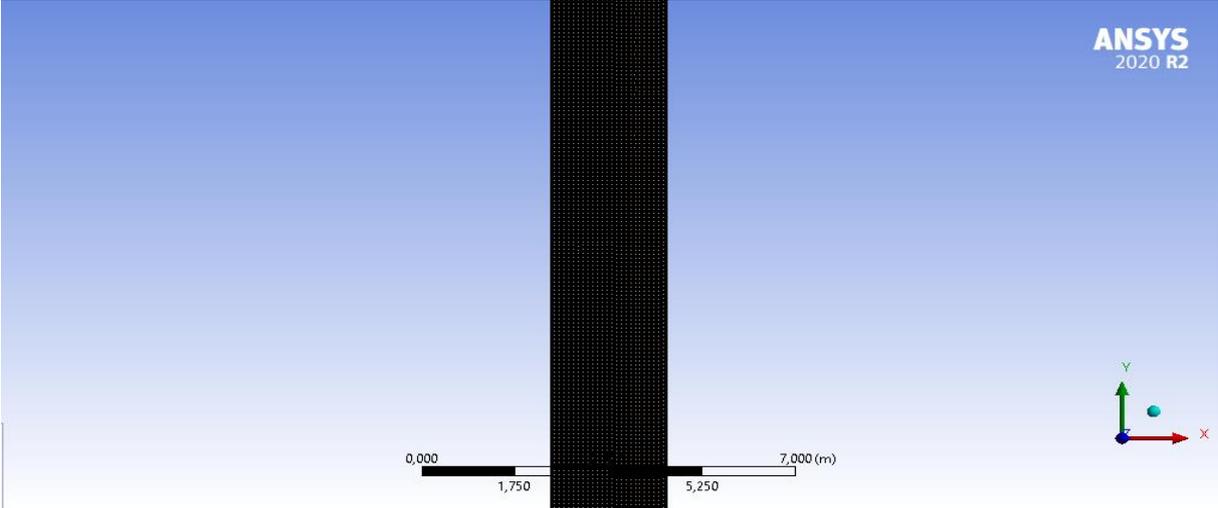


Figure 7-1 : Maillage de la paroi du bac

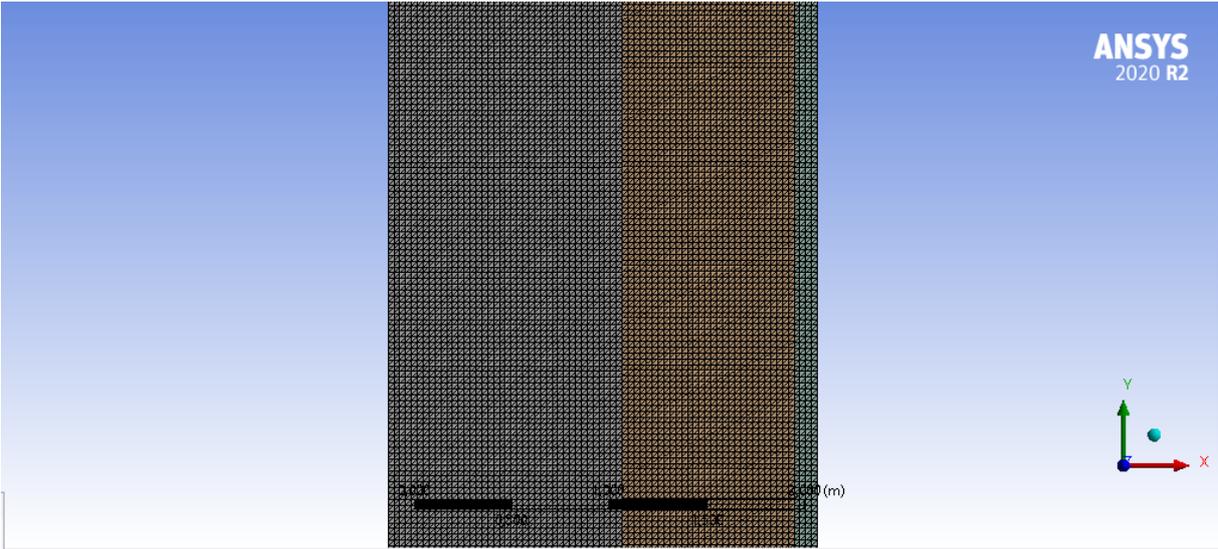


Figure 7-2 : Vue rapprochée du maillage de la paroi

7.9 Résultats et discussions :

7.9.1 Evolution de la densité de flux de chaleur en fonction de l'épaisseur :

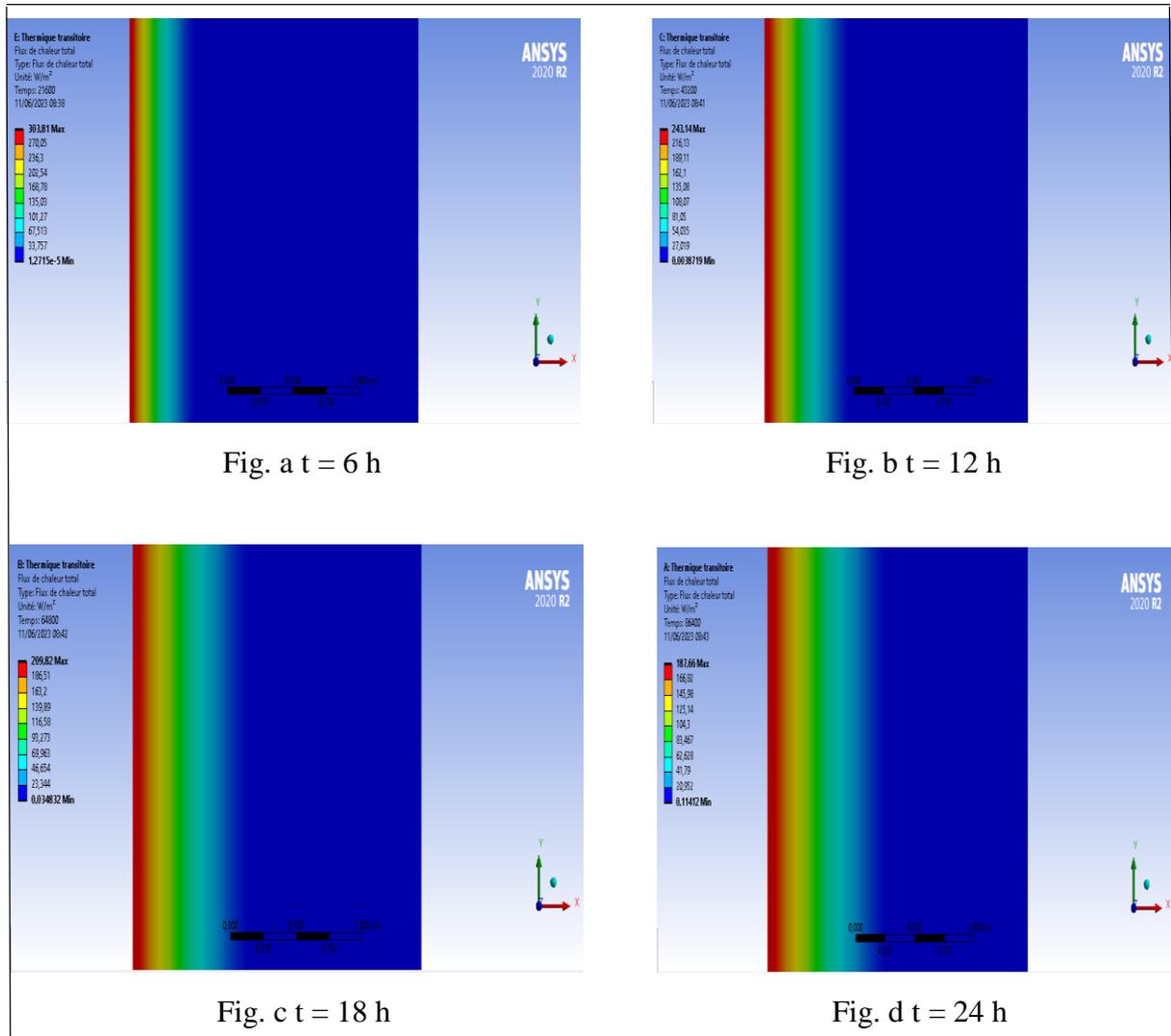


Figure 7-3 : Evolution de densité de flux de chaleur en fonction de l'épaisseur de la paroi

Sur la figure 8-2 qui représente l'évolution de la densité de flux de chaleur du temps (6h, 12h, 18h, 24h) en fonction de l'épaisseur. La variation de couleur représente la variation de flux de chaleur qui varie du rouge dans le côté extérieur de la paroi du bac qui représente les valeurs les plus élevées ou la quantité de chaleur au niveau de l'interface extérieure de la paroi est très élevée à cause de la température ambiante qui est élevée, au bleu du côté intérieur de la paroi qui représente les valeurs les plus faibles. Ces variations sont dues à l'effet des différents isolants qui constitue la paroi du bac et qui ont des caractéristiques thermiques permettent de réduire le flux de chaleur transmis au liquide.

7.9.2 Evolution de profil des températures en fonction de l'épaisseur :

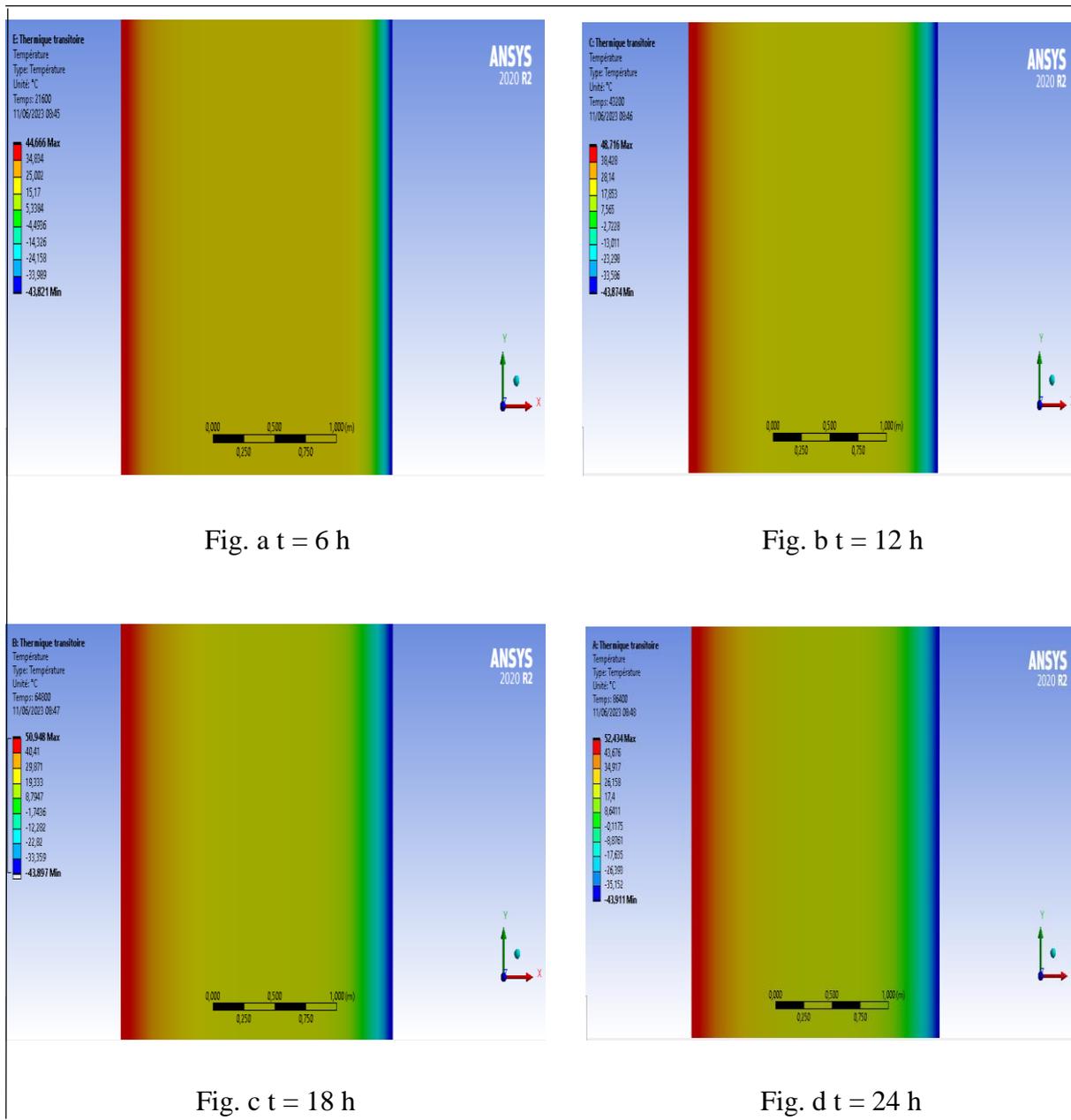


Figure 7-4 : Evolution de la température en fonction de l'épaisseur de la paroi

Sur la figure 8.3 qui représente l'évolution de la température au cours du temps (6h, 12h, 18h, 24h) et en fonction de l'épaisseur. La paroi, on constate que la température de la surface extérieure du bac est proche à la température ambiante dont la valeur maximale dans l'interface égale à 52,434 °C et diminue régressivement en fonction de l'épaisseur et au court du temps jusqu'à ce qu'elle atteinte dans la surface intérieure une valeur proche à la température du liquide qui est minimale et égale à -43,911 °C. Cela démontre que les matériaux utilisés pour l'isolation de la paroi sont efficaces pour réduire la quantité de chaleur transférée à l'intérieur du bac à travers la paroi.

7.9.3 Représentation des variations de la température en fonction de la paroi en présence de perlite

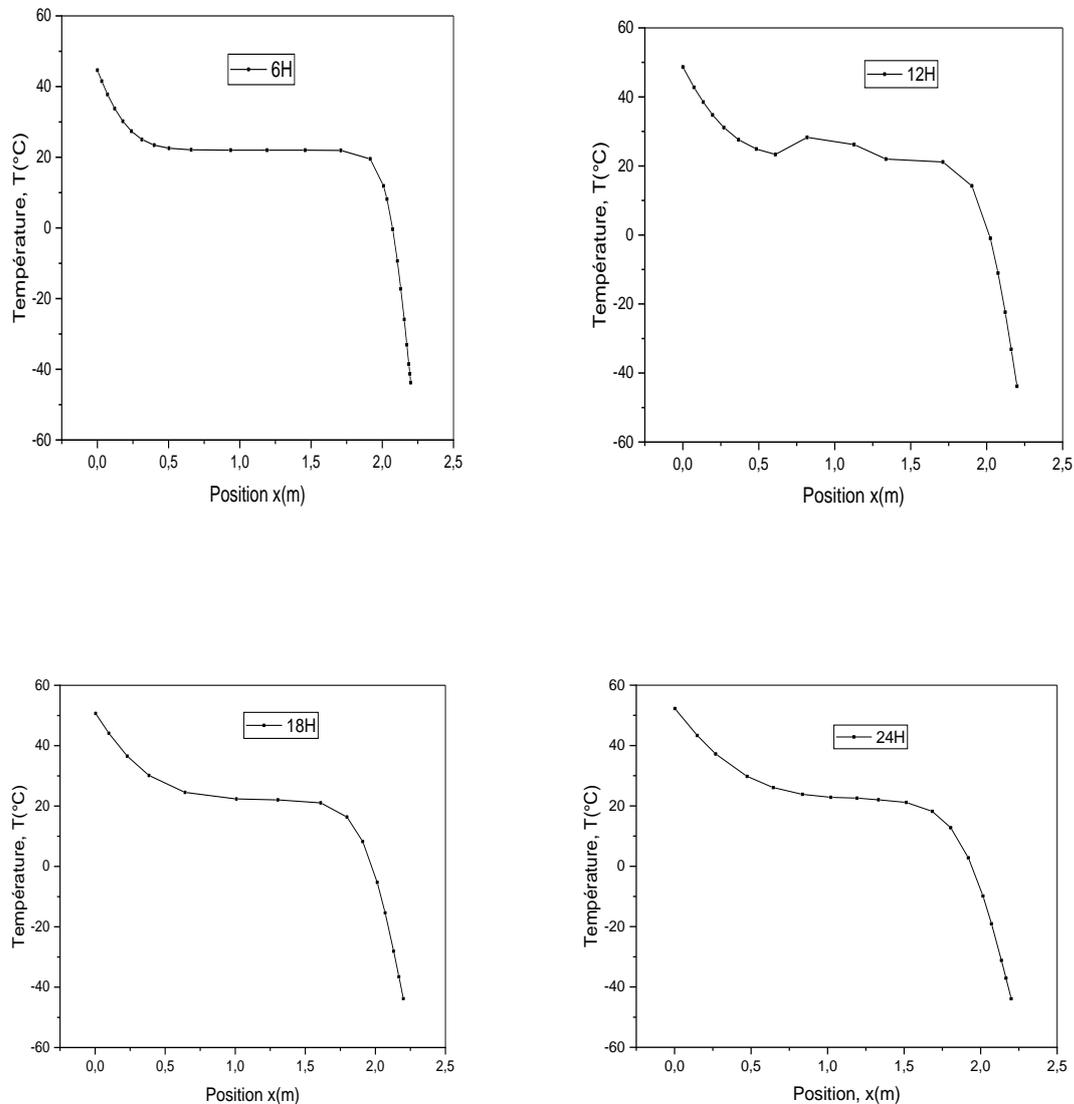


Figure 7-5 : Variation de la température en fonction de la paroi du bac

On voit que la température dans la paroi diminue en fonction de l'épaisseur et au cours du temps (6h, 12h, 18h, 24h), et l'interface de la paroi extérieure atteint une valeur maximale pendant 24 heures et qui se stabilise autour de 52,34 °C. Elle diminue régressivement jusqu'à ce qu'elle se stabilise entre la position $x=0,7$ et $x=1,5$ où se trouve le béton et la perlite puis elle chute à partir de la position $x=1,5$ jusqu'à $x=2,2$ où se trouve la perlite et la fibre de glass pour atteindre une valeur minimale $T=-43,911$ °C pendant 24 heures à l'interface de la paroi intérieure (côté liquide). Cette variation de température dans est due à l'effet des isolants qui constituent la paroi et leurs résistances au à des hautes températures.

7.9.4 Représentation des variations de la densité de flux de chaleur en fonction de la paroi du bac en présence de perlite

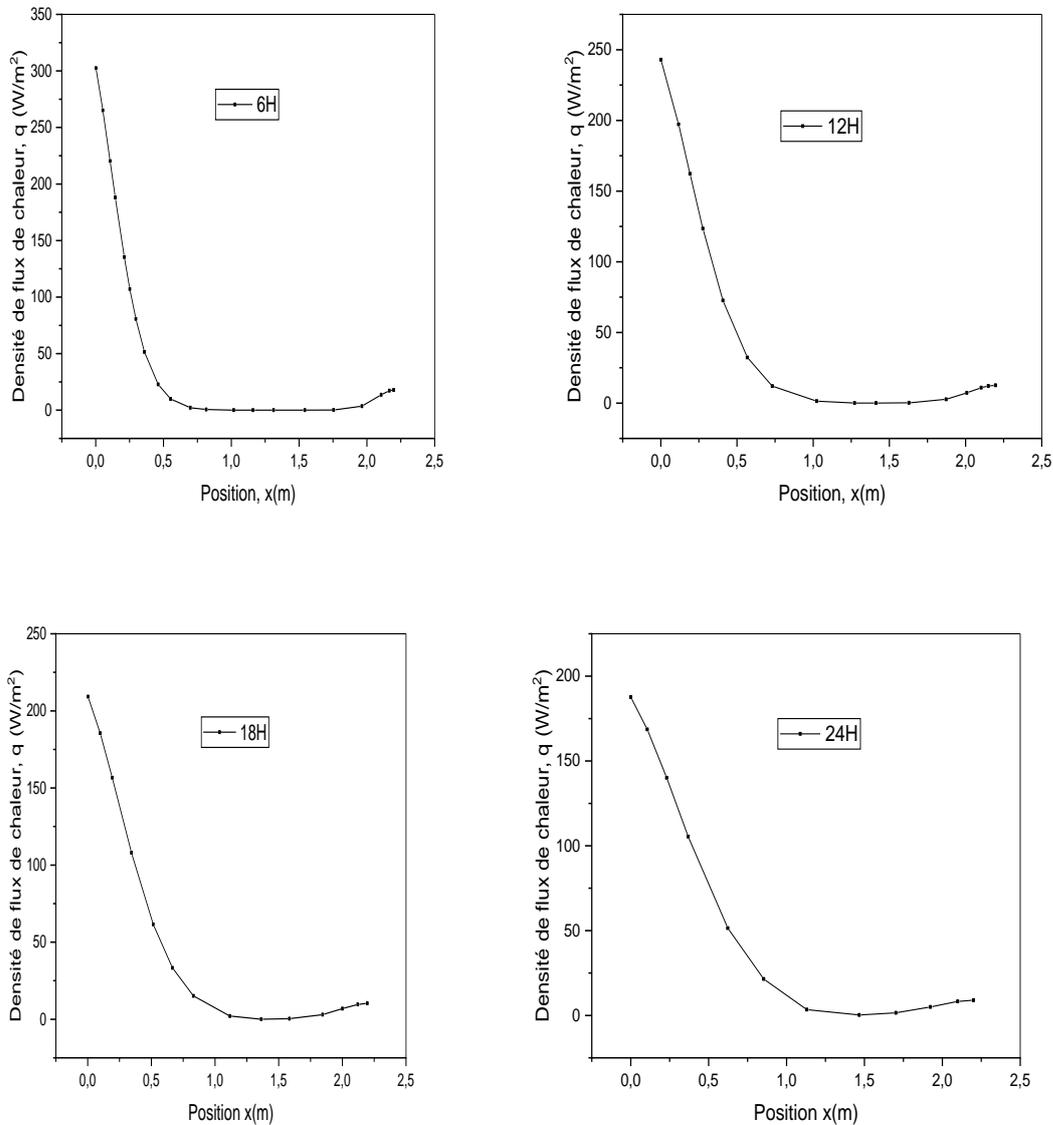


Figure 7-6 : Variation de la densité de flux de chaleur en fonction de la paroi du bac

On constate que la densité de flux de chaleur régresse au cours du temps (6h, 12h, 18h, 24h) et en fonction de l'épaisseur, et elle prend une valeur maximale égale à 187,66 w/m² au niveau de l'interface de la paroi extérieure à cause de la température ambiante élevée, et prend une valeur minimale égale à 8,94 W/m² qui reste presque stable dans la couche près de la paroi intérieure du bac (fibre de glass). Cette chute dans la densité de flux de chaleur est causée par l'effet des isolants utilisés dans la construction de la paroi qui se caractérisent par la résistance thermique à des hautes températures.

7.9.5 Cas de changement de l'isolant « perlite » par « Foam expanded polystyrene » :

Après avoir cherché dans des différentes sources, on a trouvé que le matériau « Foam expanded polystyrene » est meilleur que la perlite pour l'isolation de la paroi latérale du bac selon des différents critères tel que sa faible conductivité thermique, sa résistance mécanique et sa facilité de la mise en œuvre. Et pour confirmer, nous avons remplacé la perlite par le nouveau matériau dans notre simulation avec la même géométrie, les mêmes réglages et les mêmes conditions imposées.

7.9.6 Caractéristiques du nouveau matériau « Foam expanded polystyrene » :

Les caractéristiques du matériau proposé sont présentées dans le tableau ci-dessous :

Masse volumique (kg/m ³)	Conductivité thermique (W/m.°C)	Chaleur spécifique (J/kg.°C)	Module de Young (Pa)
79,93	0,0329	1210,0	9,328e+06

Tableau 7-2 : Caractéristique du nouveau matériau

Les résultats obtenus après la résolution de problème par le logiciel Ansys sont présentés au-dessous :

7.9.7 Evolution de profil des températures en fonction de l'épaisseur :

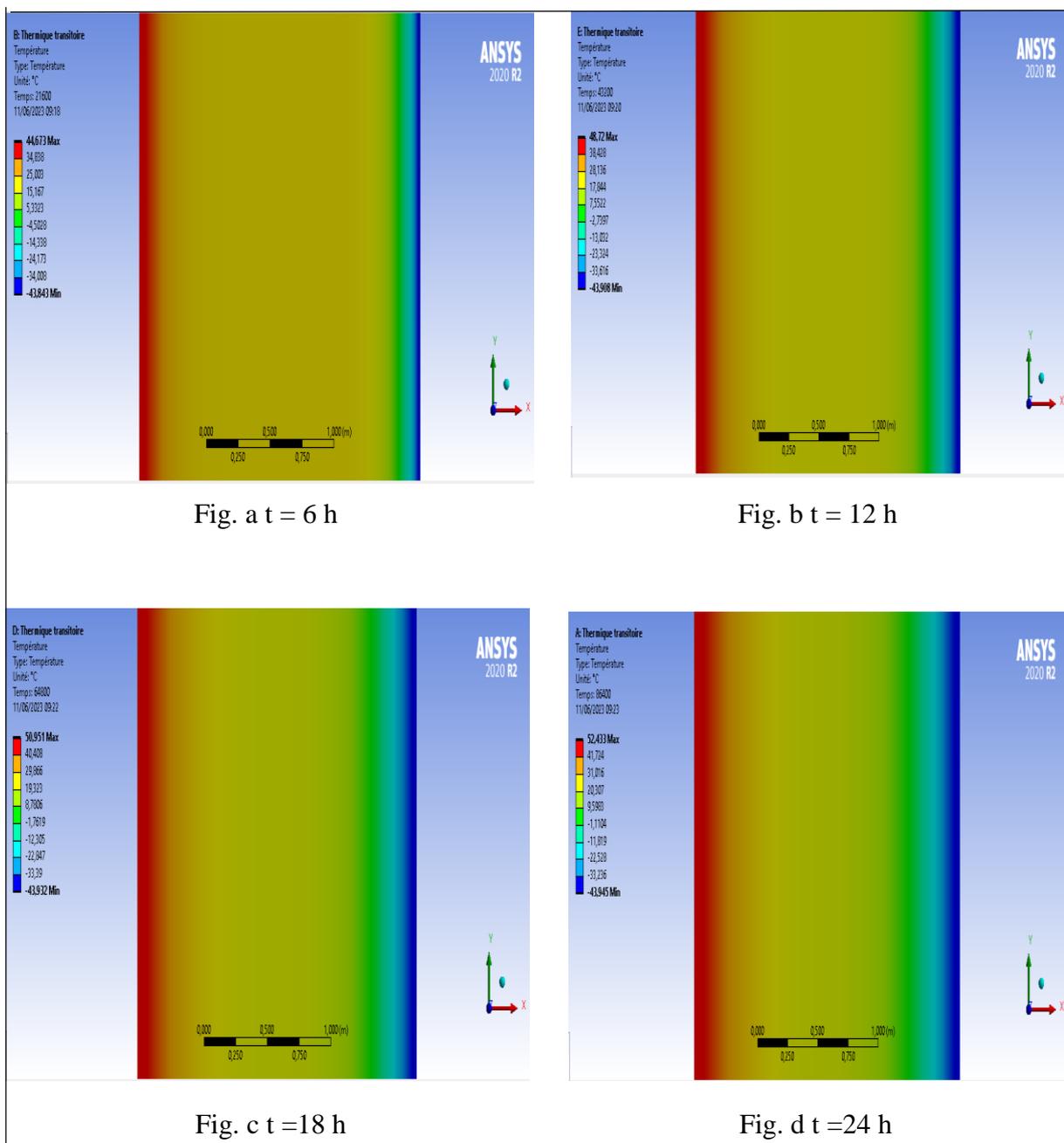


Figure 7-7 : Evolution de profile des températures en utilisant le nouveau matériau

On voit que les températures sur la paroi extérieure du bac n'ont pas changé et restent les mêmes que le premier cas $T = 52,434$, et diminuent progressivement au cours du temps (6h, 12h, 18h, 24h) et en fonction de l'épaisseur avec des valeurs plus petites par rapport au premier cas. La paroi intérieure du bac prend une valeur minimale plus faible par rapport au premier cas qui égale à $-43,945$ °C et cela en présence de nouveau matériaux « Foam expanded polystyrene » au lieu de la perlite.

7.9.8 Evolution de la densité de flux de chaleur en fonction de l'épaisseur :

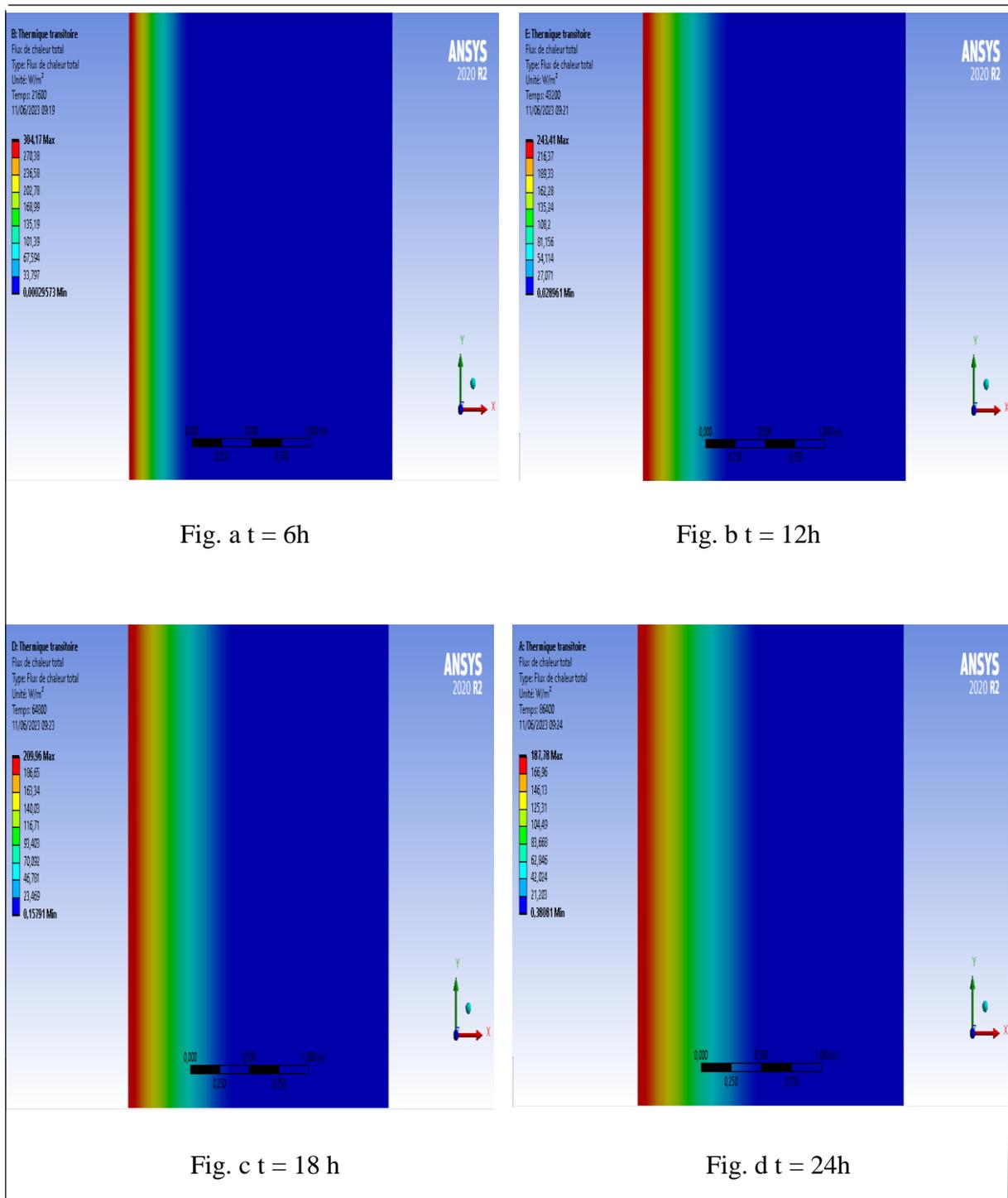


Figure 7-8 : Evolution de la densité de flux de chaleur en utilisant le nouveau matériau

On constate que la densité de flux de chaleur diminue au cours du temps (6h, 12h, 18h, 24h) en fonction de l'épaisseur tel qu'elle reste la même avec le premier cas (élevée) au niveau de l'interface de la paroi extérieure du bac à cause de la haute température ambiante puis elle diminue régressivement jusqu'à ce qu'elle chute brutalement en arrivant à la couche de l'isolant « Foam expanded polystyrene » et elle prend une valeur minimale plus faible que le premier cas du côté de la paroi intérieure du bac où se trouve le liquide.

7.9.9 Représentation des variations de la température en fonction de la paroi du bac en présence d'un isolant proposé

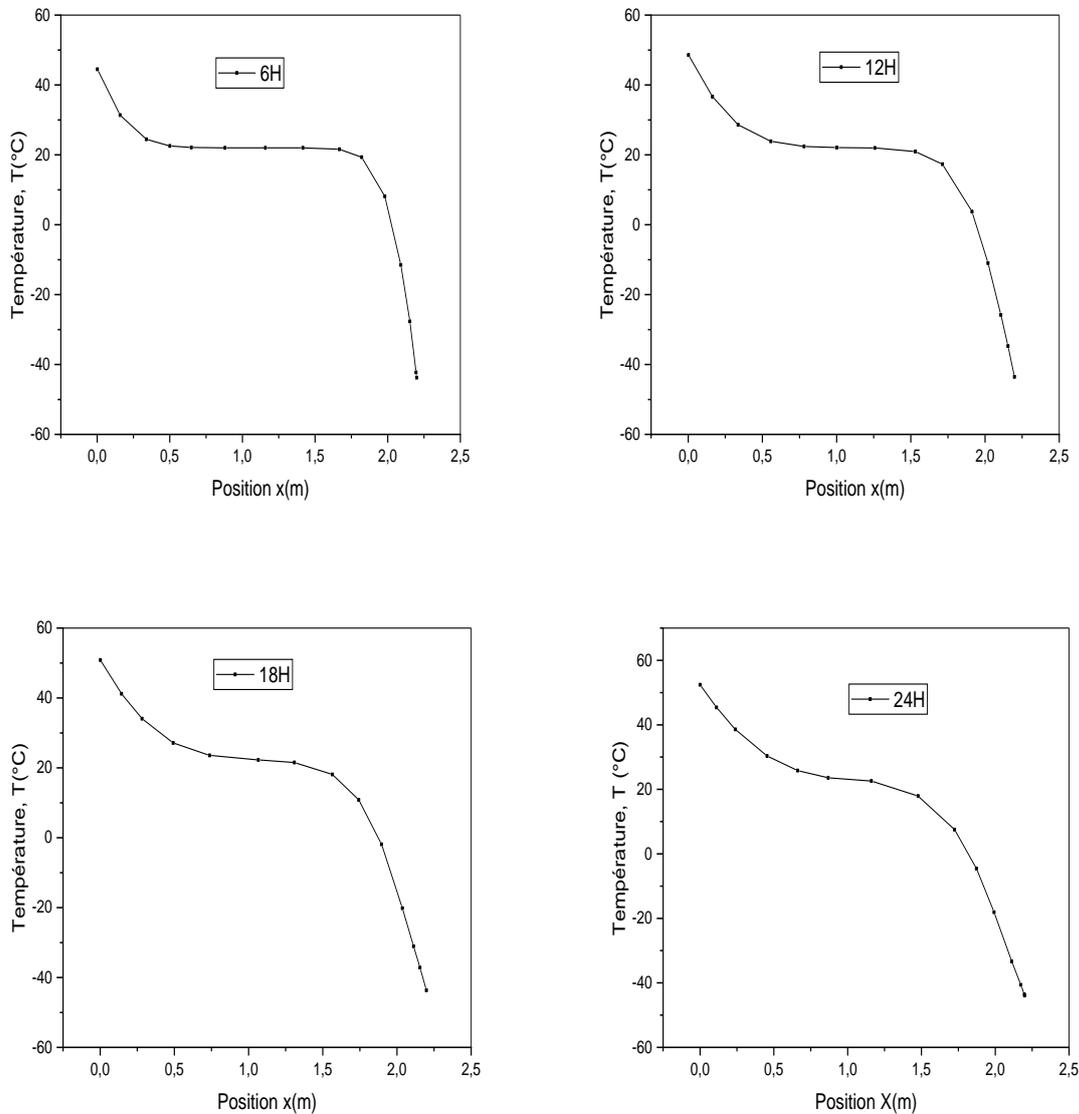


Figure 7-9 : Variation de la température en fonction de la paroi du bac

Sur la figure 8-8 qui représente la variation de la température en fonction de la paroi en présence du nouvel isolant, on remarque que la température est maximale au niveau de l'interface de la paroi extérieure du bac et augmente au cours du temps (6h, 12h, 18h, 24h) et diminue régressivement en fonction de l'épaisseur tel qu'elle se stabilise aux alentours de 20 °C à la position $x=0,7$ jusqu'à $x=1,5$ puis elle chute brutalement pour atteindre une valeur minimale plus faible par rapport au premier cas (présence de la perlite) et qui égale -43,945 °C. Cela signifie que le nouveau matériau est plus résistant au flux de chaleur entré donc il est plus efficace par rapport à la perlite.

7.9.10 Représentation des variations de la densité de flux de chaleur en fonction de la paroi du bac en présence d'un isolant proposé

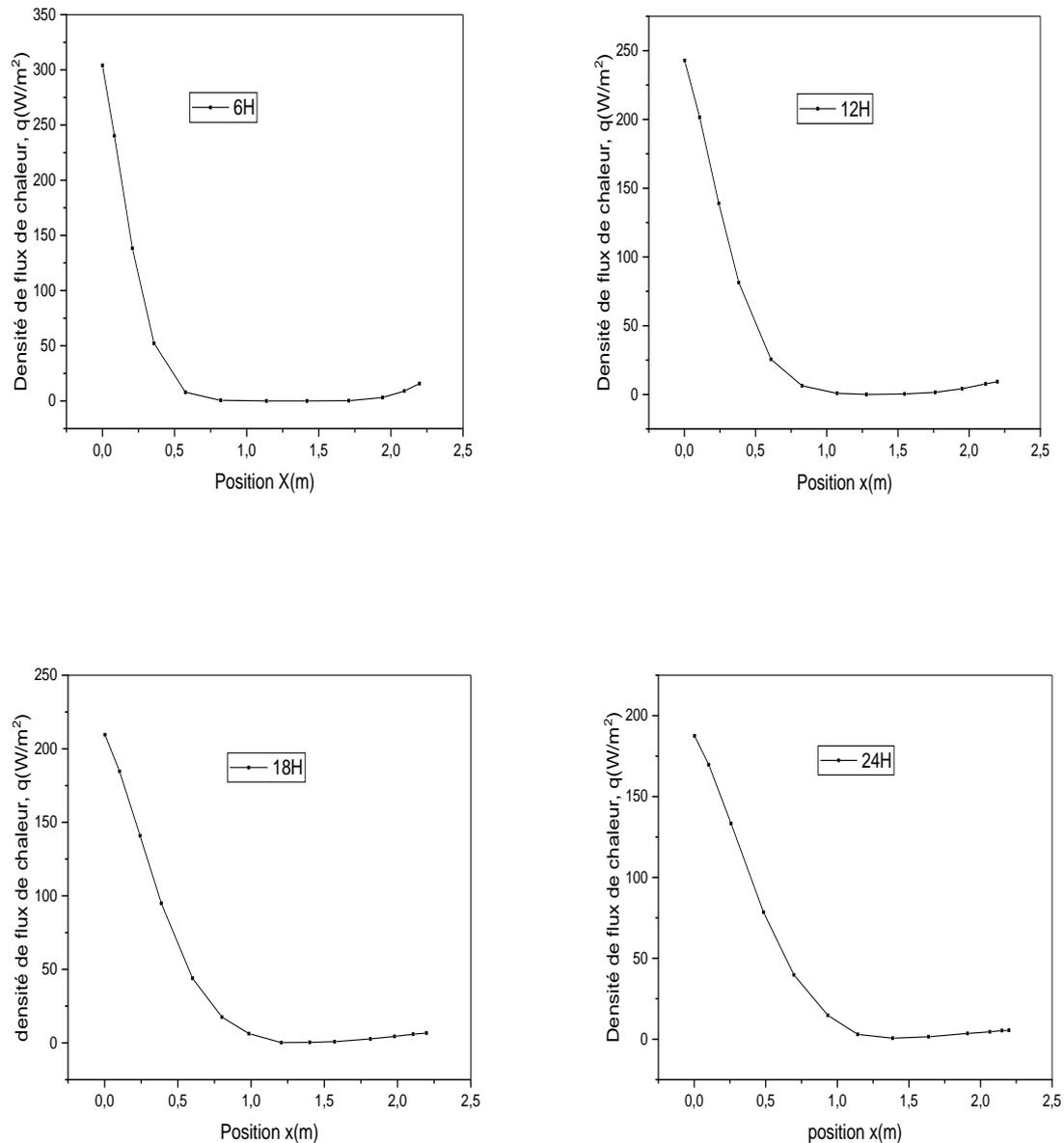


Figure 7-10 : Variation de la densité de flux de chaleur en fonction de la paroi du bac

La figure 8-9 représente la variation de la densité de flux de chaleur au cours du temps (6h, 12h, 18h, 24h) et en fonction de l'épaisseur de la paroi latérale du bac, dont on remarque que la densité est maximale au niveau de l'interface de la paroi extérieure puis elle diminue en fonction de l'épaisseur à cause de la résistance thermique des différents isolants jusqu'à $x=1,2$ et elle se stabilise à une valeur égale à $5,5 \text{ W/m}^2$ à partir de $x=1,2$ jusqu'à $x=2,2$ qui représente l'interface de la paroi intérieure du bac (coté liquide). Cette valeur est plus faible par rapport à la valeur trouvée en présence de matériau « perlite ». Ce résultat démontre que le nouveau matériau est plus efficace pour l'isolation de la paroi latérale du bac.

7.9.11 Comparaison des densités de flux de chaleur

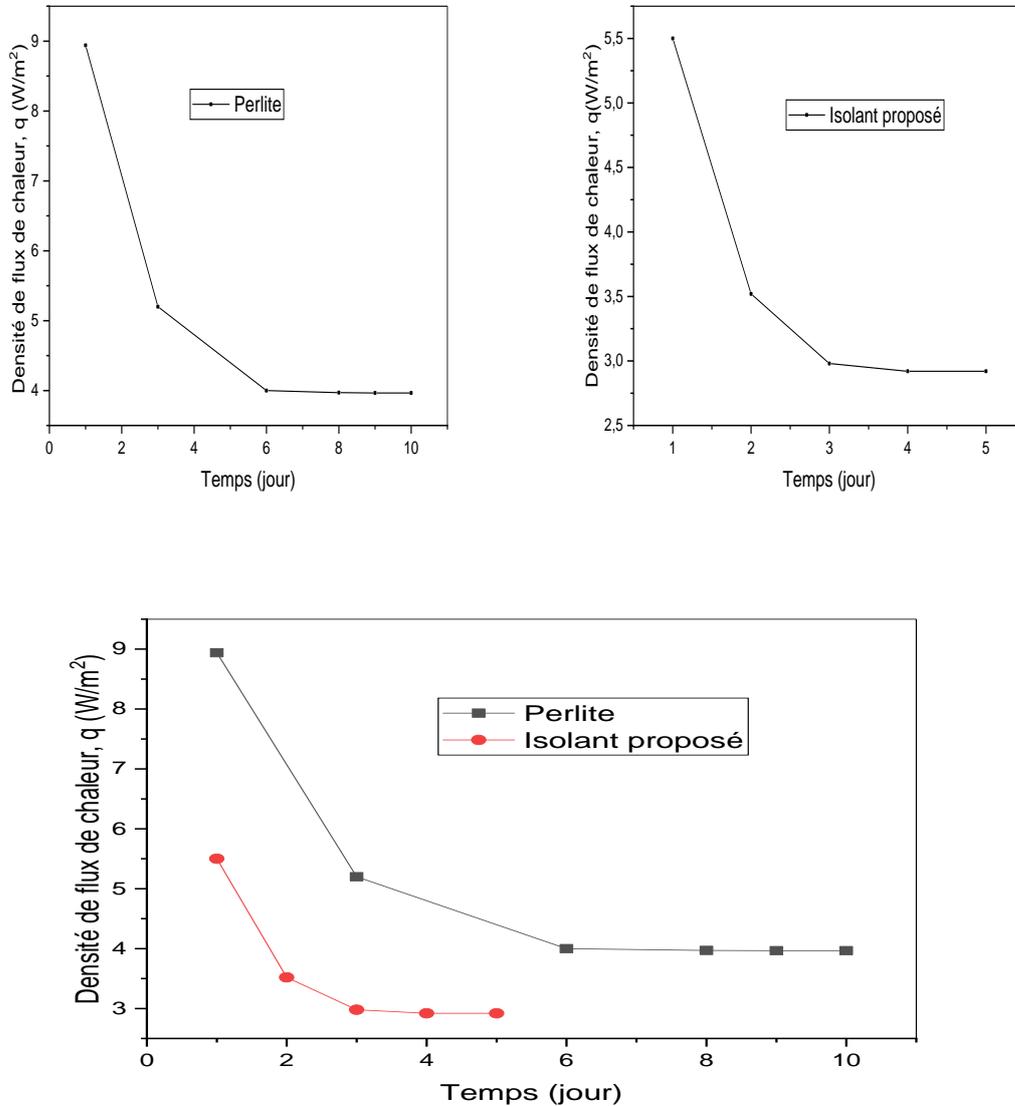


Figure 7-11 : Comparaison des densités de flux de chaleur en fonction du temps

On voit que la densité de flux de chaleur dans l'interface de la paroi intérieure du bac prend une valeur maximale égale à $8.94 W/m^2$ après une journée en présence de perlite, et prend une valeur maximale égale à $5.5 W/m^2$ après une journée en présence du nouveau matériaux « Foam expanded polystyrene », puis elle diminue régressivement au cours du temps pour se stabiliser après 8 jours en présence de la perlite et prend une valeur égale à $3.965 W/m^2$, et en présence du nouveau matériau elle se stabilise après 4 jours à une valeur égale à $2.92 W/m^2$.

Cela explique que le nouveau matériaux attribué et plus fiable que la perlite pour l'isolation de la paroi latérale du bac vu à sa diminution de flux de chaleur entré dans le bac et par la suite les pertes de charge et la taux d'évaporation du produit stocké.

VII.8.11. Validation des résultats :

Pour valider nos résultats, on les compare avec les trois résultats (celui trouvé par le constructeur, celui trouvé dans notre expérience et celui trouvé quand nous avons changé l'isolant) en calculant la masse du liquide évaporée :

$$m_{\text{evap}} = Q / L$$

Avec:

$$Q = q_{\text{cond}} \times S \quad S = 2 \times \pi \times R_i \times h$$

- Constructeur :

$$m_{\text{evap}} = \frac{23513}{425315}$$

$$m_{\text{evap}} = 0,055 \text{ kg/s}$$

- Notre expérience :

$$m_{\text{evap}} = \frac{3,965 \times 2 \times \pi \times 27,815 \times 31,8}{425315}$$

$$m_{\text{evap}} = 0,052 \text{ kg/s}$$

- Dans le cas de changement de l'isolant perlite par « Foam expanded polystyrene » :

$$m_{\text{evap}} = \frac{2,92 \times 2 \times \pi \times 27,815 \times 31,8}{425315}$$

$$m_{\text{evap}} = 0,038 \text{ kg/s}$$

VII.8.12. Comparaison des résultats trouvés et discussion :

Cas	Constructeur	Notre expérience	Nouveau isolant
Masse évaporée (kg/s)	0,055	0,052	0,038

Tableau 7-3 : Comparaison des masses du liquide évaporé

Ces valeurs représentent la masse du liquide évaporée et pour notre cas d'expérience nous avons trouvé une valeur raisonnable. Cette différence entre la masse évaporée trouvée dans notre expérience et celle trouvée par le constructeur est expliquée par la négligence du rayonnement solaire et l'isolation adiabatique supposée au niveau des interfaces du fond et au sommet de la paroi, aussi par la différence de températures de stockage du produit où le constructeur la considérée $T = -51 \text{ }^\circ\text{C}$ et dans notre expérience nous l'avons pris $T = -44 \text{ }^\circ\text{C}$ qui est la température de stockage de propane dans le bac T0001 qui appartient au complexe GP1Z.

Chapitre VII : Partie logiciel, résultats et discussion

Ces températures sont proportionnelles au taux d'évaporation, tel plus que la température de stockage est faible plus que le taux d'évaporation est élevé.

Dans le but de trouver un isolant plus efficace, nous avons utilisé l'isolant (Foam expanded polystyrene). Ce dernier a donné des résultats plus importants au point de vue thermique vu qu'il donne une meilleure isolation et un taux d'évaporation qui ne dépasse pas 0,038 kg/s. l'étude finale nécessite une évaluation technico économique pour effectuer le remplacement de l'isolant proposé.

Conclusion générale :

Dans le présent travail, nous a permis de s'approcher de plus près envers les causes essentielles de l'évaporation du produit hydrocarboné GPL au niveau du bac de stockage aérien et cylindrique.

Le suivi de procès du stockage nous a permis de déduire que les problèmes majeurs de qualité et de sécurité des bacs de stockage du propane dans le complexe GP1Z sont liés principalement aux pertes de charges qui sont dues au phénomène d'évaporation causé en premier lieu par les mouvements en régime de transfert (réception et expédition) et le transfert de chaleur dû au gradient de température entre le milieu extérieur et le sein du bac.

A cet effet, nous avons procédé aux calculs analytiques des transferts de chaleur à travers le mur, le toit et la base du bac de stockage. Ces flux de chaleur permettent de trouver le flux total qui pénètre à l'intérieur du liquide et provoque son évaporation. Le taux d'évaporation calculé à la base de ces flux de chaleur globaux par le constructeur est légèrement supérieur à celui calculé dans notre cas vu à la différence de température de stockage.

Alors que l'utilisation du logiciel Ansys a permis d'obtenir la même valeur du constructeur en négligeant le transfert par le toit et la base.

Selon l'étude élaborée et d'après la simulation effectuée, nous avons trouvé que nous pouvons remplacer l'isolant « perlite » dans la paroi latérale du bac par un isolant meilleur qui est « Foam expanded polystyrene ». Grace à sa faible conductivité thermique, il permet de diminuer la quantité de chaleur transmise au sein du liquide et par la suite obtenir un taux d'évaporation plus faible.

Aussi comme proposition, puisque les bacs sont installés proche de la mer, on propose de d'installer un système de rosage pour les bacs en utilisant l'eau de mer et profiter de sa disponibilité. Cela peut se faire en installant une unité de dessalage et de refroidissement et la raccorder avec une conduite de circulation qui mène vers le système de rosage. La basse température de l'eau va diminuer la quantité de chaleur transférée au sein du bac, par conséquent le taux d'évaporation du propane sera aussi diminué. En parallèle, la section de reliqufaction peut être mise en arrêt total vu à sa grande consommation d'énergie.

Ces propositions sont basées sur une étude préalable est menée afin de minimiser ces pertes énergétiques et économique, réduire la pollution résultant des gaz torchés et essentiellement comme mesure de sécurité des bacs en cas d'éventuelles incidents liés aux risques d'inflammation ou d'explosion.

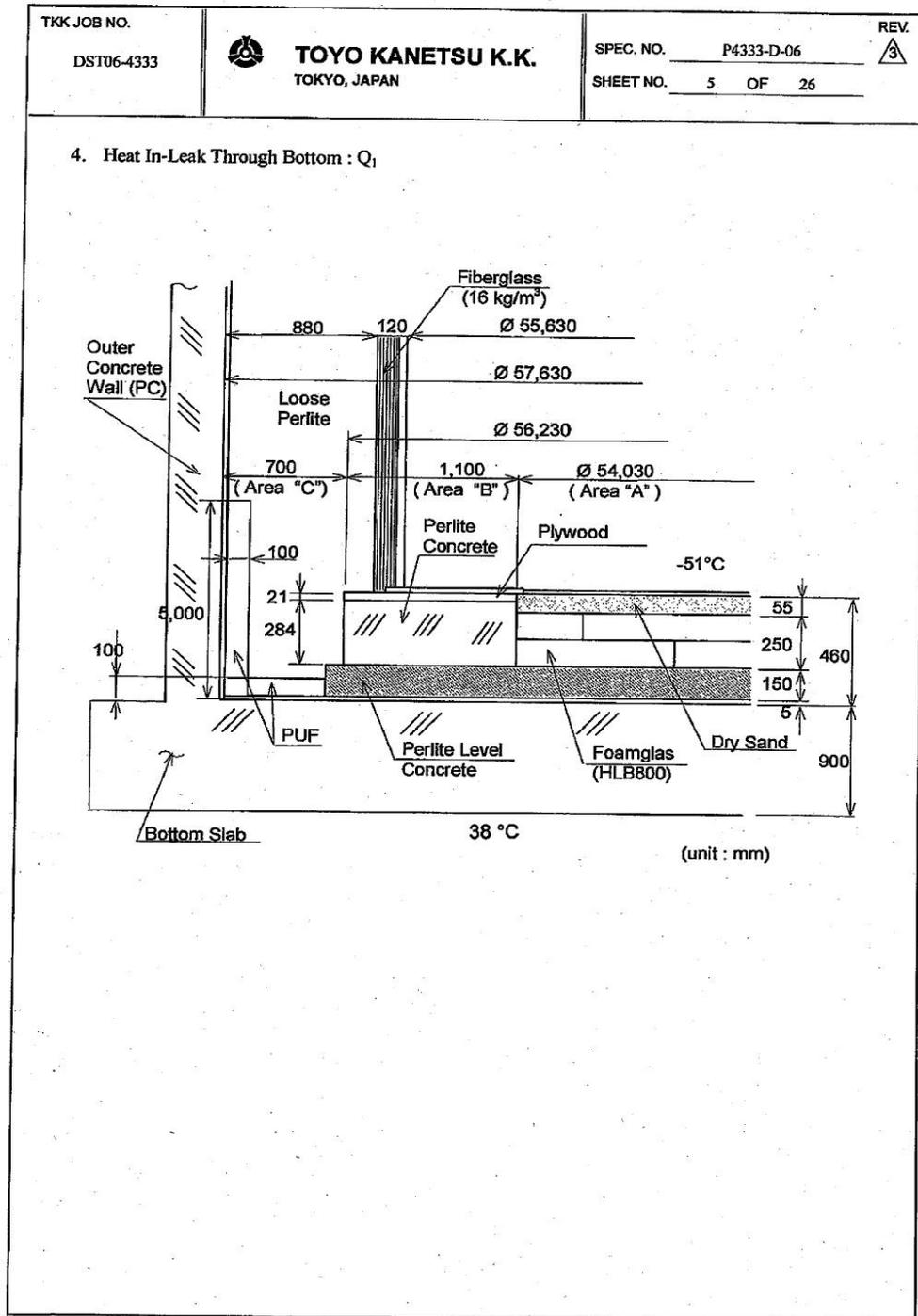
Références bibliographiques :

1. FORMATION PROFESSIONNALISANTE PRO/RCP3, INGÉNIEURS MAINTENANCE Matériaux, Équipements statiques M. Nicolas HREBLAY , 2015.
2. FORMATION PROFESSIONNALISANTE PRO/RCP3, Ingénieurs Maintenance Technologie---Opération---Maintenance des équipements thermiques Hassi Messaoud Avril 2015 M. Philippe BUCH---M. Alain GILIBERTI , 2015.
3. Mémoire fin d'étude BOUIDIA Mustapha Ibrahim et BESSELMA Latifa
4. Mémoire de fin d'étude (Mme. RIHAMI Samira, IAP, 2007)
5. Transfert de chaleur (Cours Dr. Sophie Mergui ; UV : Sorbonne)
6. Mémoire de fin d'étude master académique, Mr. HAMMADI Omar & HAMMOU Benadda 2019
7. Ren, J. Zhang, H. Bi, M. Yu, J. Sun, S., «Numerical investigation of the coupled heat transfer of liquefied gas storage tank,» *Int. J. Hydrogen Energy*, 2017.
8. ANSYS, Inc., ANSYS Fluent, Release 20.2, Theory Guide, ANSYS, Inc...
9. Khelifi-Touhami, M.S. Benbrik, A. Lemonnier, D. Blay, D., «Laminar natural convection flow on a cylindrical cavity application to the storage of LNG,», 2010.
10. Manuel opératoire du complexe GP1Z
11. Manuel opératoire du complexe GP1-Z section de stockage
12. Catalogue mécanique, IHI/ GP1/Z section de stockage
13. Shi, J. Bi, M. Yang, X., «Experimental research on thermal stratification of liquefied gas in tanks under external thermal attack,» , 2012.
14. Ren, J. -J. Shi, J. -Y. Liu, P. Bi, M. -S. Jia, K., «Simulation on thermal stratification and de-stratification in liquefied gas tanks,» , 2013.
15. Seo, M. Jeong, S. , «Analysis of self-pressurization phenomenon of cryogenic fluid storage tank with thermal diffusion model,» , 2010.

16.R. Hariti, «MODELISATION DES INFILTRATIONS THERMIQUES DANS LE BAC DE STOCKAGE DE GNL APPLICATION A LA PREDICTION DU TAUX D'EVAPORATION,» *Mémoire de Magister, Université de Boumerdes, 2007.*

Annexes

Annexes :



Dimensions du fond du bac T0001

TKK JOB NO.
DST06-4333

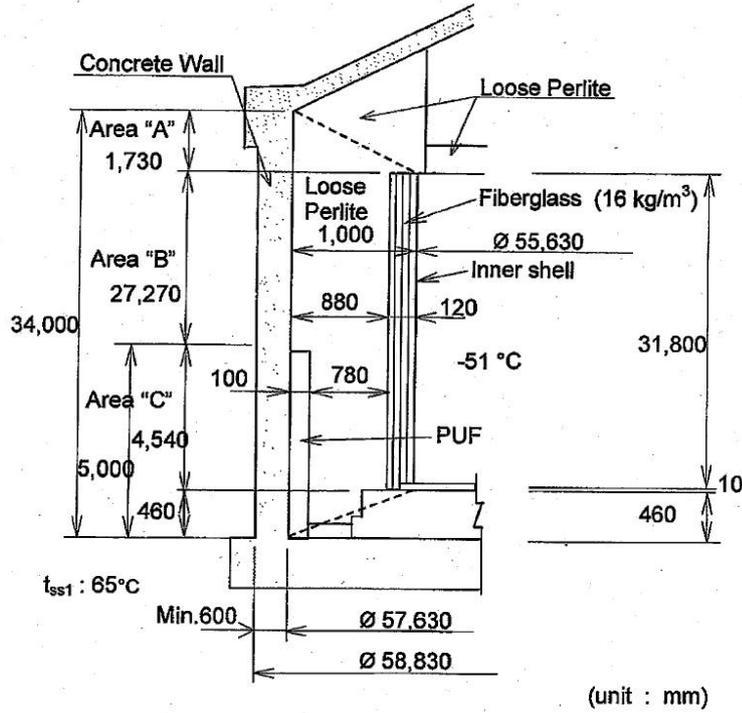


TOYO KANETSU K.K.
TOKYO, JAPAN

SPEC. NO. P4333-D-06
SHEET NO. 7 OF 26

REV.
3

5. Heat In-leak Through Wall : Q_2



(Note) Temperature for concrete wall surface

t_{ss1} : 65°C (@day time : include solar radiation)

t_{ss2} : 38°C (@night time and shade area)

P4333-D-06-R3

Dimensions de la paroi latérale du bac T0001

TKK JOB NO.

DST06-4333



TOYO KANETSU K.K.
TOKYO, JAPAN

SPEC. NO. P4333-D-06

SHEET NO. 11 OF 26

REV.



6. Heat In-leak Through Roof: Q_R

6.1 Heat In-leak

[Calculation Formula]

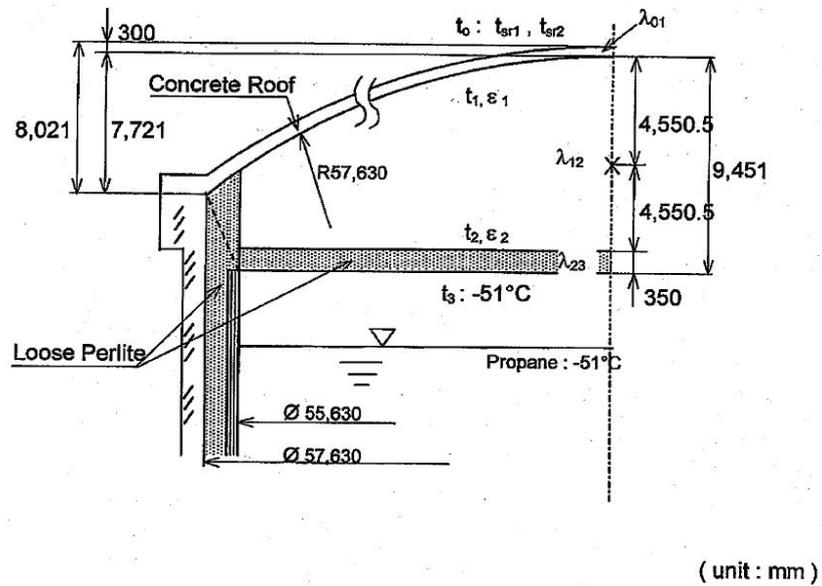
$$Q = q \times A$$

Where,

Q : Heat inleak (W)

A : Heat transfer ave. area (m^2)

q : Heat flow (W/m^2)



P4333-D-06-R3

Dimensions du toit du bac T0001