



REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR
ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE ECHAHID HAMMA LAKHDAR, EL OUED



FACULTE DE LA TECHNOLOGIE

Département de Génie des Procédés et Pétrochimie

Mémoire de fin d'étude

Présenté pour l'obtention du diplôme de :

MASTER ACADEMIQUE

Domaine : Sciences et Technologies

Filière : Industrie pétrochimique

Spécialité : Génie Pétrochimique

Thème

**L'étude de la possibilité d'utilisation du theminol SP
comme fluide caloporteur a la place du therminol 66
en l'unite de l'Hamra**

Présenté par :

- *Kais OUAGHED*
- *Tarek TRIKI*

Soutenu publiquement le :

Devant le Jury composé de :

Président

CHabia Nacer

Examineur

Khaled Bilel

Encadreur

Abdelmadjid Guerram

2021 - 2022



Département de Génie des Procédés et Pétrochimie

Mémoire de fin d'étude

Présenté pour l'obtention du diplôme de :

MASTER ACADEMIQUE

Domaine : Sciences et Technologies

Filière : Industrie pétrochimique

Spécialité : Génie Pétrochimique

Thème

L'étude de la possibilité d'utilisation du theminol SP
comme fluide caloporteur a la place du therminol 66
en l'unite de l'Hamra

Présenté par :

Kais OUAGHED

Tarek TRIKI

Soutenu publiquement le :

Devant le Jury composé de :

Président

CHabia Nacer

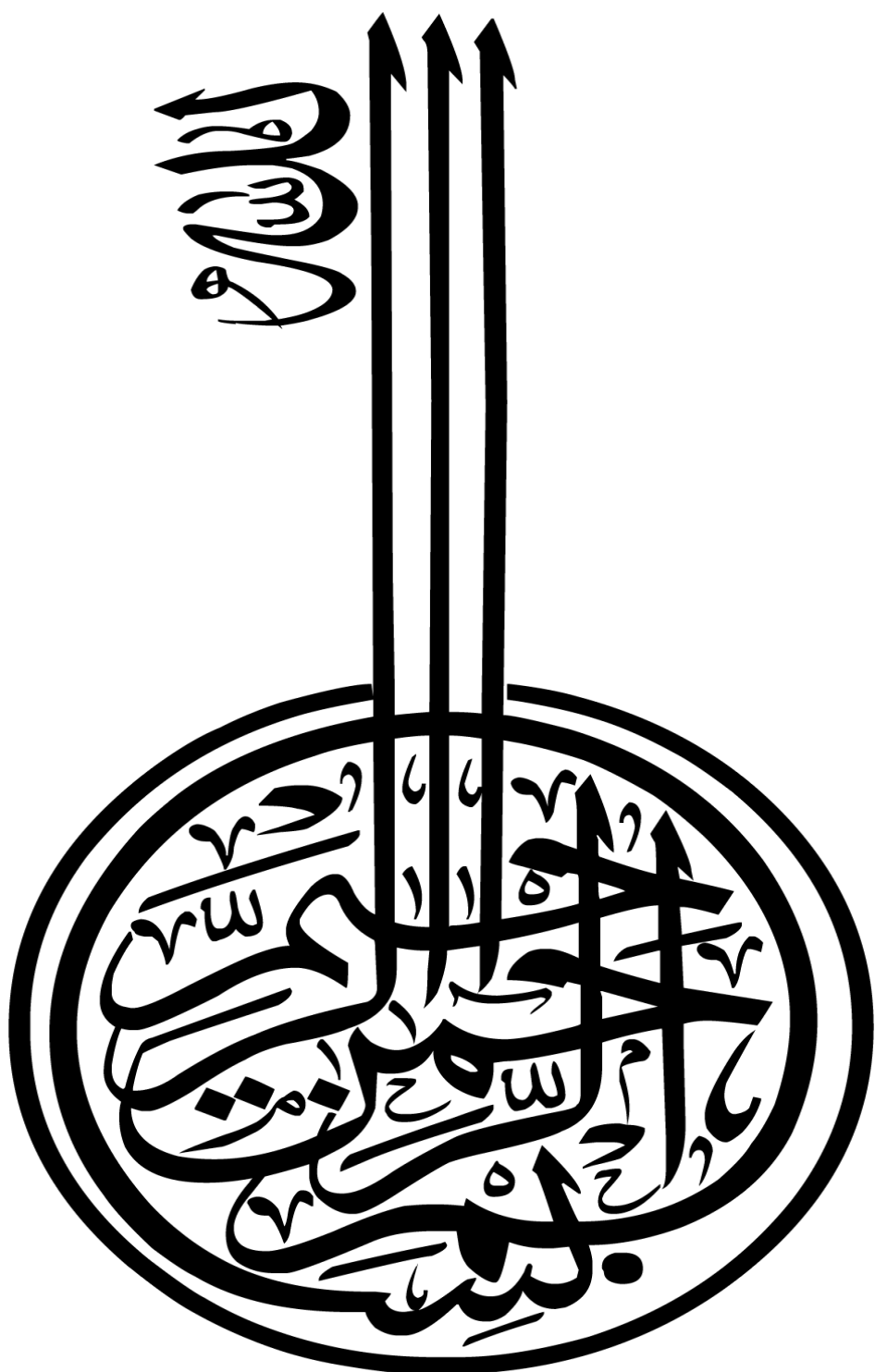
Examineur

Khaled Bilel

Encadreur

Abdelmadjid Guerram

2021 - 2022



Remerciements

Avec les plus grands mots de remerciement, de gratitude et d'appréciation pour les efforts remarquables et tangibles que vous avez déployés, qui ont laissé une marque claire sur le succès de ce travail, et nous n'avons rien trouvé d'autre que de vous présenter une forme de lettre formelle afin d'exprimer un petite partie de l'étendue de nos remerciements, de notre appréciation et de notre fierté. Puissiez-vous avoir la force, Avec nos meilleurs vœux de progrès et de succès.

Je souhaite que Dieu Tout-Puissant vous donne la santé et le bien-être, merci pour les sentiments que vous m'avez procurés émanant de votre cœur, et que Dieu vous bénisse et que vos dons durent.

SOMMAIRE

<i>Titre</i>	<i>Page</i>
Introduction	1
Chapitre I : Description de l'usine de l'Hamra	3
1-Présentation du champ de Hamra	4
2-Capacité des installations	4
3-Description général de l'usine	4
4-Composition du gaz brut traité par l'usine et caractéristiques des produits	6
5-Téchnique de traitement de gaz à l'unité de Hamra	9
6-Description du procédé de traitement	10
Chapitre II : Description du système huile chaude	14
1-Description de circuit et conditions de fonctionnement	15
2-Propriétés et caractéristiques du Therminol 66	19
3-Système de drainage	25
Chapitre III : Les fluides caloporteurs	27
1-Définition d'un fluide caloporteur	28
2-Critères de choix des fluides caloporteurs	28
3-Propriétés des fluides caloporteurs et leurs principales applications	31
4-Fluides caloporteurs dans l'industrie pétrolière en Algérie	40
5-Facteurs à considérer pour le choix d'un fluide caloporteur	43
Chapitre IV : Problématique du sujet	44
1-Problème du sujet	45
2-Propriétés et caractéristiques du Therminol SP	45
Chapitre V : Comparaison des caractéristiques et des propriétés thermique du Therminol 66 et Therminol SP	52

1-Comparaison des caractéristiques des deux huiles	53
2-Interprétation des courbes	59
Chapitre VI: Calcul thermique des équipements du circuit d'huile chaude	61
I- Calcul thermique du four 141/F-01	62
II- Calcul thermique du l'aéroréfrigérant 141/EA-01	73
III- Calcul thermique du rebouilleur 10/E-08	80
IV- Calcul thermique du rebouilleur 10/E-09	87
V- Calcul thermique du réchauffeur régénérateur du déshydrateur gaz 10/E-10	91
VI- Calcul thermique du réchauffeur régénérateur du déshydrateur liquide 10/E-11	100
VII- Calcul thermique du réchauffeur de GPL 10/E-15	104
VIII- Calcul thermique du réchauffeur de fuel gaz 120/E-0	107
IX- Calcul de vérification de la pompe de circulation de l'huile chaude 141/P-01 dans les deux cas de fonctionnement	110
Conclusion	117
Recommandation	120
Bibliographie	122
Annexes	124
Résumé	133

LES TABLEAU

Nom	Page
Tableau n°01 : Caractéristiques du gaz brut entrée unité	7
Tableau n° 02 : Caractéristiques du gaz produit (gaz sec)	8
Tableau n° 03: Caractéristiques de GPL	8
Tableau n°04: Caractéristiques de condensat	9
Tableau n°05: Caractéristiques et conditions de fonctionnement de Ballon tampon	18
Tableau n°06: Caractéristiques et conditions de fonctionnement des Pompes	18
Tableau n°07: Caractéristiques et conditions de fonctionnement de Four	18
Tableau n°08: Caractéristiques et conditions de fonctionnement de aéroréfrigérant	19
Tableau n°09 : données process du Therminol 66 dans les équipements Thermiques	19
Tableau n°10 : Propriétés physico-chimique du Therminol	20
Tableau n°11:) Evolution du propriétés thermiques du Therminol 66 en fonction de la température	21
Tableau n°12 : Principaux critères de choix des fluides organiques	36
Tableau n°13 : Leurs températures de fusion et d'ébullition sont indiquées	39
Tableau n°14: Les propriétés thermiques de quelques métaux caloporteurs	39
Tableau n°15 : Propriétés physico–chimiques de la TORADA TC32.	41
Tableau n°16: Propriétés physico-chimique du Therminol SP	46
Tableau n°17: Evolution du propriétés thermiques du Therminol SP en fonction de la température	46
Tableau n°18 : les principales caractéristiques des deux huiles	53
Tableau n°19 : les caractéristiques de la zone de convection et de la zone de radiation du four de préchauffe du Therminol 66.	62
Tableau n°20 : Les résultats de calcul des coefficients de transfert thermique	72

et les pertes de charge à l'intérieur des tubes pour les deux cas d'huile caloporteuse	
Tableau n°21 : Propriétés Therminol 66 comme fluide caloporteur	74
Tableau n°22 : Propriétés thermiques moyennes aux conditions de service (Tmoy)	74
Tableau n°23 : Les résultats de calcul des pertes de charge "ΔP"	80
Tableau n°24 : Caractéristiques du rebouilleur 10/E-08 :	81
Tableau n°25 : Propriétés thermiques moyennes aux conditions de service (Tmoy=250°C)	81
Tableau n°26 : Les résultats de calcul des pertes de charge "ΔP"	87
Tableau n°27: Caractéristiques du rebouilleur 10/E-09	
Tableau n°28: Propriétés thermiques moyennes aux conditions de service (Tmoy=265°C)	88
Tableau n°29 :Cas d'utilisation du Therminol SP	90
Tableau n° 30 : Caractéristiques du réchauffeur 10/ E-10	92
Tableau n° 31 : Propriétés thermiques moyennes aux conditions de service (Tmoy)	92
Tableau n° 32 : Résultats du calcul pour des pertes de charge coté calandre	99
Tableau n°33 : Caractéristiques du réchauffeur 10/ E-11	
Tableau n°34 : Propriétés thermiques moyennes aux conditions de service (Tmoy)	101
Tableau n°35: La surface d'échange installée du 10/E -11 l'échange thermique imposé	103
Tableau n°36: Propriétés thermiques moyennes aux conditions de service (Tmoy)	104
Tableau n° 37 : Propriétés thermiques moyennes aux conditions de service (Tmoy)	105
Tableau n°38 : Les propriétés thermiques du Therminol SP sont déterminées à la température moyenne de service : Tmoy = 245°C.	107
Tableau n°39 : Caractéristique du réchauffeur du fuel gaz 120 / E-	
Tableau n°40 : Propriétés thermiques moyennes aux conditions de service (Tmoy) :	108

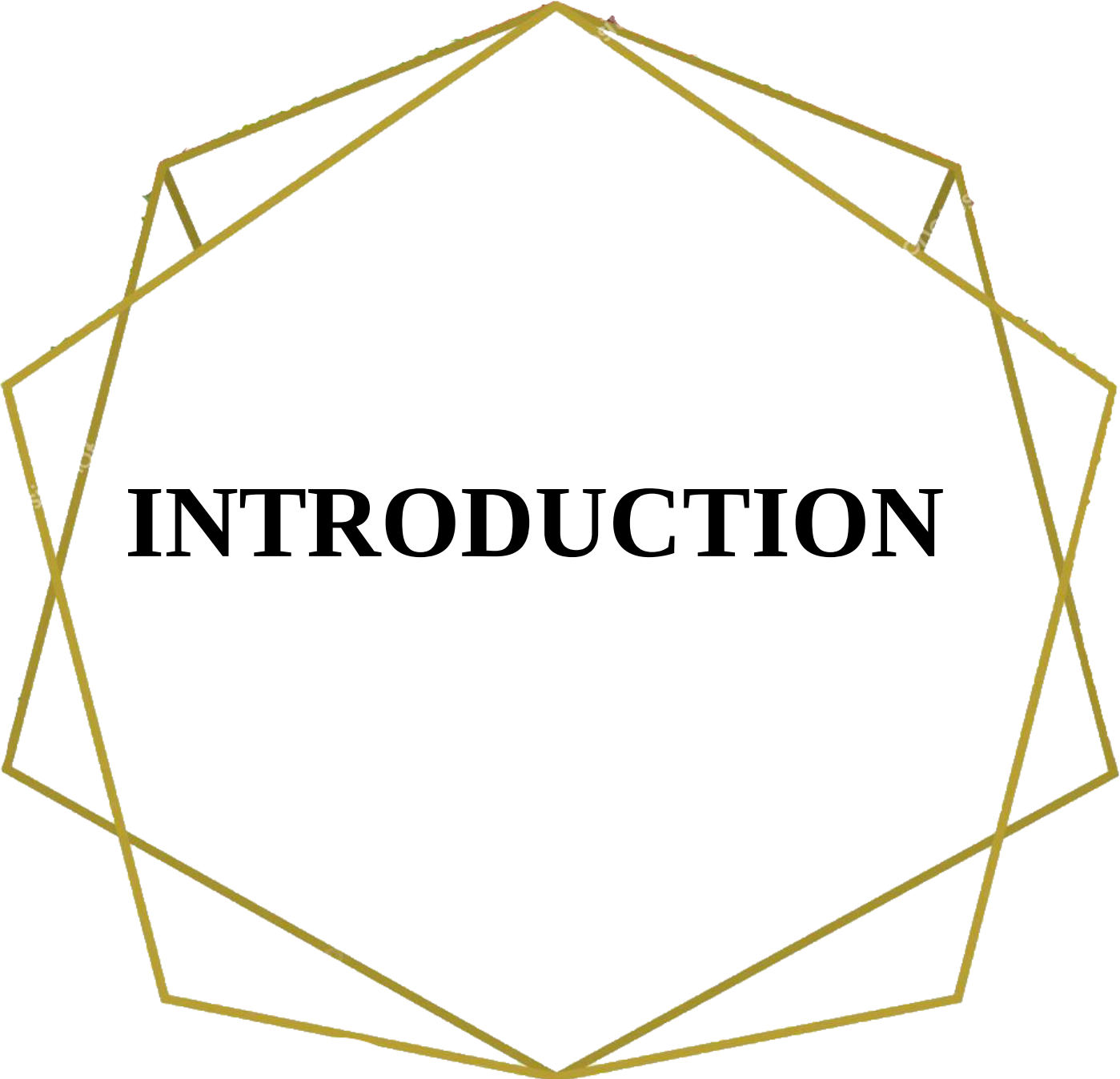
Tableau n°41 : Les propriétés thermiques du Therminol SP sont déterminées à la température moyenne de service	110
Tableau n° 42 : caractéristiques de la pompe 141/P-01 dans le cas de marche avec Therminol SP	116
Tableau n°43 : les différents paramètres de fonctionnement de la pompe et on vérifié l'état de son fonctionnement avec le Therminol SP :	117
Tableau n°44 : résultats du calcul.	117

LES FIGUER

Nom	Page
figure n°1: la carte géographique	4
figure n°02: Schéma simplifié de traitement et de compression du gaz de Hamra	10
figure n°03 : Schéma de procédé	11
figure n°04 : schéma du système huile chaude	17

Figure n°05 : Variation de la masse volumique du Therminol 66 en fonction de la température	23
Figure 06 :Variation de la conductivité thermique du Therminol 66 en fonction de la température.	23
Figure 07 : Variation de la chaleur massique du Therminol 66 en fonction de la température.	24
Figure 08 : Variation de la viscosité dynamique du Therminol 66 en fonction de la température	25
Figure 09 : Variation de la pression de vapeur du Therminol 66 en fonction de la température.	26
Figure n°10 :Variation de la masse volumique du Therminol SP en fonction de la température	48
Figure n° 11 Variation de la conductivité thermique du Therminol SP en fonction de la température	49
Figure n°12 : Variation de la chaleur massique du Therminol SP en fonction de la température	49
Figure n°13 : Variation de la viscosité dynamique du Therminol SP en fonction de la température	50
Figure n°14:Variation de la pression de vapeur du Therminol SP en fonction de la température	50
Figure n°15.Variation de la masse volumique du Therminol 66 et Therminol SP en fonction de la température	54
Figure n°16.Variation de la conductivité thermique du Therminol 66 et Therminol SP en fonction de la température	55
Figure n°17.Variation de la chaleur massique du Therminol 66 et Therminol SP en fonction de la température	55
Figure n°18.Variation de la viscosité dynamique du Therminol 66 et Therminol SP en fonction de la température	56
Figure n°19.Variation de pression de vapeur du Therminol 66 et Therminol SP en fonction de la température	56
Figure n°21 : Schéma de la section de pompage de l'huile chaude	112
Figure n°22 : caractéristiques de la pompe de circulation d'huile chaude	118

(données par le constructeur).



INTRODUCTION

INTRODUCTION

INTRODUCTION

Face au pétrole, son concurrent sur les marchés des combustibles mais souvent aussi son associé dans les gisements d'hydrocarbure et au cours de leur exploitation, le gaz naturel est apparu longtemps comme forme d'énergie difficile à mettre en œuvre, tout particulièrement en raison du poids des investissements et des coûts de traitement et de transport.

Dans une première étape, le gaz est séparé en phases vapeur et liquide, ces deux phases sont à l'origine d'alimentation des différentes sections de traitement afin d'obtenir les produits désirés tel que : GPL, Condensat, gaz sec, propane et le butane selon les besoins de marché et la demande de consommation.

Durant son traitement, le gaz doit être déshydraté afin d'éliminer l'eau restant qui est l'origine de formation des hydrates dans les déshydrateurs généralement à tamis moléculaire avant d'être séparé. Pendant ces étapes de traitement, les besoins en calories peuvent être assurés soit par chauffage direct des produits (flamme des brûleur, rebouillage) ou par le réchauffage indirect grâce aux fluides de transfert thermique appelés fluides caloporteurs dans des systèmes de boucle de chauffage fermée.

Au niveau de l'unité de traitement et de recyclage du gaz "Hamra" les besoins en chaleur pour le fonctionnement normal des unités de traitement (Train 10 et 20) et l'unité de distribution du fuel gaz (l'unité 120) sont assurés par une huile caloporteuse importée dite "**Therminol 66**", chauffée de 230 °C à 300°C la température exigée par le procédé. Le volume d'huile en circulation est de 160 m³ pour les deux trains de traitement.



Chapitre I :

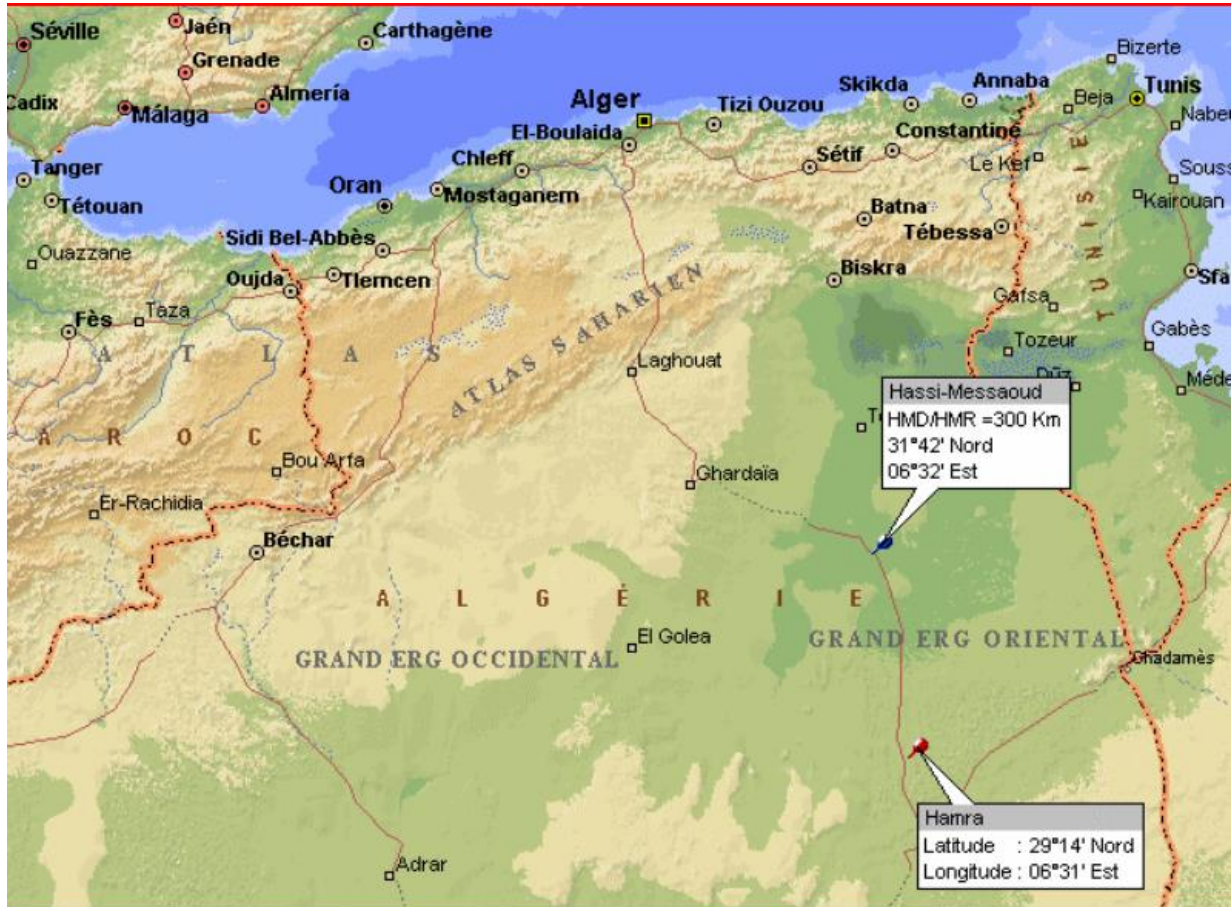
Description de l'usine

Hamra

Chapitre I : Description de l'usine Hamra

I.1- Présentation du champ de Hamra : [1]

Le champ de Hamra se trouve dans le grand Erg Oriental à une altitude de 285 m. Il se situe à 300 Km au sud de Hassi-Messaoud, à 800 KM du chef lieu de la wilaya d'ILLIZI et à 60 Km de Rhourde-Nouss. Le premier puits de Hamra a été foré sur la bordure Est du permis d'El-Biod, en 1956, suite à une anomalie positive décelée par l'étude gravimétrique (voir la figure n°1).



I.2- Capacité des installations:

Le complexe de Hamra a une capacité journalière de traitement de $15 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ du gaz brut pour produire:

- $13 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ du gaz sec.
- 2800 tonnes du Condensat.
- 1400 tonnes du GPL.

I.3- Description général de l'usine:

Le complexe de traitement de gaz naturel de Hamra se compose principalement des unités suivantes:

3-1) puits producteurs:

Un réseau de collecte d'une longueur de 42 km relie onze puits producteurs au complexe par l'intermédiaire de quatre manifolds de diamètre de 8", 12" et 16".

La capacité de production moyenne de chaque puits est de $1.5 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ par jour.

3-2) Trains de traitement de gaz (Unité 10/20):

Il y a deux trains de traitement de gaz pour la récupération des hydrocarbures lourds contenus dans le gaz brut et la stabilisation des condensats récupérés.

La capacité de chacun des deux trains est de $7,5 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ de gaz brut.

3-3) Boosting (Unités 51/52):

La section de boosting se compose de deux turbocompresseurs de fabrication Nuovo Pignone, de type centrifuge BCL 506.

Chaque compresseur est entraîné par une turbine Général Electrique de type MS 3002. Les deux machines ramènent la pression du gaz traité de 40 bars à 75 bars.

3-4) Réinjection (Unités 61/62) :

La section de réinjection se compose de deux turbocompresseurs de fabrication de Nuovo Pignone, de type centrifuge BCL 405A et BCL 304B, entraîné chacun par une turbine à gaz de marque Général Electrique de type MS 5002. La station de réinjection comprime le gaz sec de 75 bars à 275 bars.

3-5) Puits injecteurs:

Le complexe est relié aux huit puits injecteurs par deux dessertes d'une longueur totale de 36 km avec des diamètres de ligne de surface de 6 et 12 pouces.

La capacité d'injection moyenne de chaque puits est de $1,7 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ de gaz sec par jour.

3-6) Aire de stockage de condensat "Unité 190" :

La zone de stockage et d'expédition de condensat se compose de :

- Deux bacs à toits flottants d'une capacité de 6000 m^3 chacun.
- D'un bac à toit fixe pour le condensat hors spécifications d'une capacité de 2000 m^3 .
- Trois pompes d'expédition de condensat d'un débit unitaire de $130 \text{ m}^3/\text{h}$.

3-7) Aire de stockage de GPL "Unité 180" :

La zone de stockage et d'expédition de GPL se compose de :

- Trois sphères d'une capacité de 2000 m^3 chacune.
- Une sphère de capacité de 900 m^3 pour le GPL hors spécifications.
- Deux pompes boosters d'un débit de $190 \text{ m}^3/\text{h}$ chacune.

- Trois pompes de ligne d'un débit de $95 \text{ m}^3/\text{h}$ chacune.

3-8) Les utilités:

La zone des utilités se compose des sections suivantes:

- La centrale électrique "U-240/241/242" qui se compose de deux turboalternateurs d'une puissance totale de 38 MW et de deux groupes de secours (diesel).
- Une unité de production d'air service et d'air instrument. "U-100".
- Une unité de production d'Azote "U-110" pour l'inertage des équipements lors des travaux.
- Une unité de traitement des eaux de service "U-170" qui consiste en une filtration à travers des lits de sable et une chloration.
- Une unité de stockage et de régénération des huiles de graissage par centrifugation "U-130".
- Une unité de stockage et de distribution de l'huile chaude (**Therminol 66**) "U- 140/141/142".
- Une unité de traitement des eaux usée "U-230"
- .

3-9) Les systèmes auxiliaires :

- Système d'évacuation du gaz vers gazoduc (U-05).
- Système de vidange permet d'acheminer tous les liquides de vidange vers le système de traitement des eaux huileuses "U-02".
- Système d'injection de méthanol vers différents points dans le complexe.
- Système torches comprenant deux torches chaudes, une torche sèche, une torche froide, une torche basse pression, et le borbier (U-130).
- Système d'eau anti-incendie (U-150).

I.4- Composition du gaz brut traité par l'usine et caractéristiques des produits :**4-1) Gaz brut :**

L'installation a été conçue sur la base des données suivantes :

Tableau n°01 : Caractéristiques du gaz brut entrée unité

Composition	% molaire
H ₂ O	0,158
N ₂	2,1464
CO ₂	0,45
C ₁	82,7277
C ₂	7,6415
C ₃	2,8324
iC ₄	0,9909
nC ₄	1,0463
iC ₅	0,5233
nC ₅	0,3513
nC ₆	0,3818
nC ₇	0,2106
nC ₈	0,1248
nC ₉	0,113
nC ₁₀	0,022
nC ₁₁	0,079
nC ₁₂	0,067
nC ₁₃	0,052
nC ₁₄	0,043
nC ₁₅	0,033
nC ₁₆	0,006
Poids moléculaire	20,41
Débit d'aliment (kmol/h)	12145
Température (°C)	48,7
Pression (bar)	105,5

4-2) Caractéristiques des produits :

Le complexe Hamra nous permet de produire les produits dont les caractéristiques et la composition données par laboratoire de contrôle de qualité.

Les tableaux n°2,3 et 4 donnent respectivement la composition molaire du gaz de vente, de GPL et de Condensat produits au niveau de l'unité :

4-2-1) Gaz de vente :

Tableau n° 02 : Caractéristiques du gaz produit (gaz sec)

Elément	% molaire
N ₂	2,268
CO ₂	0,407
C ₁	87,508
C ₂	8,783
C ₃	0,908
iC ₄	0,072
nC ₄	0,054

- Point de rosée à 81,5 bars eff.....<-6°C.
- Température (sortie Unité 10)..... 55°C.
- Pression (sortie unité 10)41,6 bar .
- Pouvoir calorifique supérieur "PCS"9350 ÷ 9450 Kcal/ m³.
- Teneur en C₅⁺ :.....0,5 %molaire max.

4-2-2) GPL :

Tableau n° 03: Caractéristiques de GPL

Elément	% molaire
C ₂	0,623
C ₃	56,866
iC ₄	20,823
nC ₄	21,688

- Teneur en C₂⁻ :.....3% mol.
- Teneur en C₅⁺ :.....0,4 % mol.

4-2-3) Condensat :

Tableau n°04: Caractéristiques de condensat

Elément	% molaire
iC ₄	0,18
nC ₄	4,96
iC ₅	17,186
nC ₅	11,453
nC ₆	18,628
nC ₇	15,456
nC ₈	14,869
nC ₉	7,863
nC ₁₀	4,096
nC ₁₁	2,093
nC ₁₂	1,389
nC ₁₃	0,744
nC ₁₄	0,433
nC ₁₅	0,293
n C ₁₆	0,190
n C ₁₇	0,137

➤ Tension de vapeur :.....0,9 bar.

On note que le GPL et le condensat hors-spec sont stockés au niveau d'aire de stockage hors spécifications puis sont recyclés et retraités pour répondre aux spécifications exigées.

I.5- Technique de traitement de gaz à l'unité HAMRA : [1]

Pour le champ de Hamra, le procédé mis en œuvre est le **Procédé de HUDSON** qui est donnée dans la figure n° 03.

Il est basé sur le refroidissement du gaz par échange thermique et complété par une détente à travers une machine appelée TURBO-EXPANDER, qui permet d'atteindre un niveau de température de moins de -55°C.

Le procédé HUDSON est très performant, il permet une meilleure récupération des hydrocarbures liquides. Le gaz en provenance des puits producteurs est un mélange (gaz et hydrocarbures liquides) contenant une faible

proportion d'eau du gisement. Il se présente à une pression de 105 bars et une température de 49°C

Le principe de fonctionnement s'articule autour de quatre étapes:

➤ **Elimination de l'eau:**

L'eau libre contenue dans la charge est éliminée par décantation dans les premiers ballons.

➤ **Extraction des hydrocarbures liquides:**

Elle se fait par un abaissement progressif de température du gaz brut, obtenant un gaz très sec répondant aux spécifications commerciales.

➤ **Stabilisation et fractionnement:**

Cette section permet le traitement des hydrocarbures liquides extraits de l'effluent

La stabilisation permet d'éliminer tous les gaz légers tel que le méthane et l'éthane entraînés par les hydrocarbures liquides lors des différentes séparations dans les ballons.

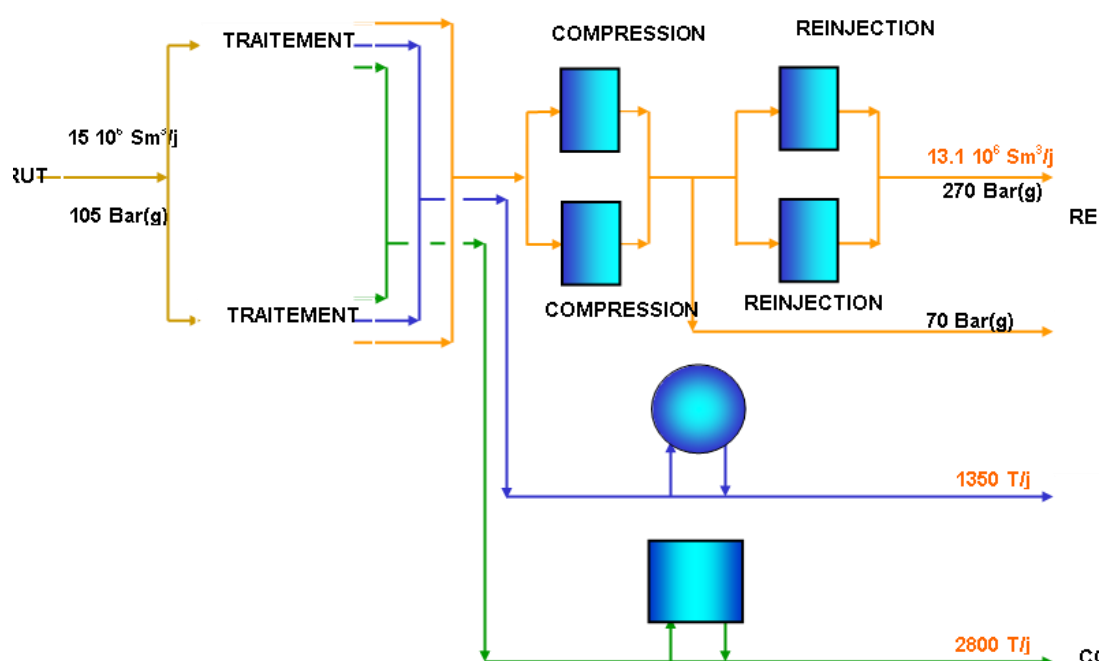
Le fractionnement consiste à séparer les hydrocarbures liquides stabilisés en condensat et GPL.

➤ **Recompression du gaz:**

Le gaz doit être compresser pour avoir la pression de ligne (gaz de vente) ou être compresser une deuxième fois pour avoir la pression réinjection (gaz de réinjection).

Le technique de traitement de gaz à Hamra est donnée dans la figure n°02.

Figure n°02 : Schéma simplifié de traitement et de compression du gaz de Hamra



I.6- Description du procédé de traitement : [1]

Le but de l'usine de Hamra est le traitement du gaz brut, et la réinjections du gaz sec dans le gisement après la séparation du condensât et des GPL.

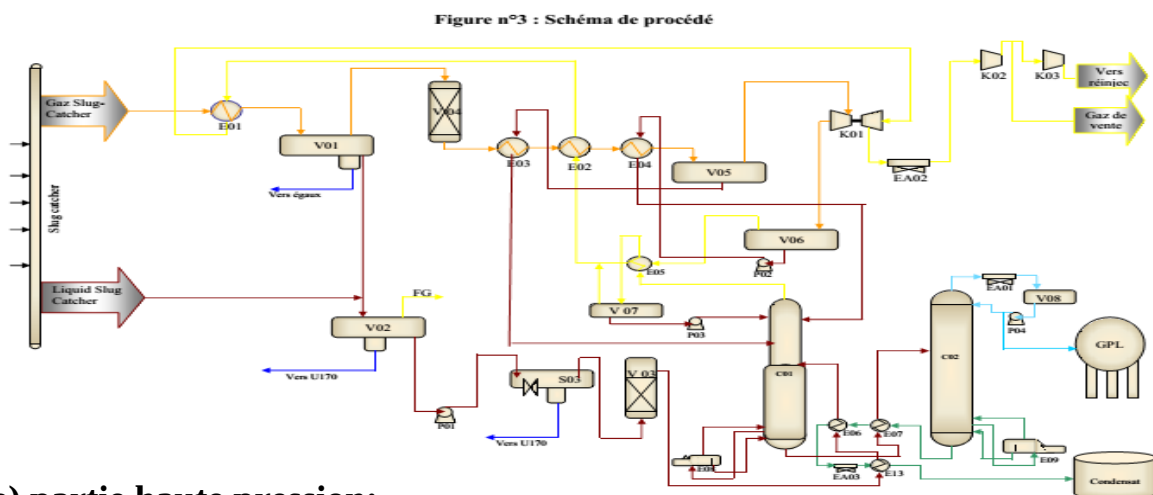
Le gaz est réinjecté dans le gisement afin de maintenir la pression nécessaire pour l'extraction des hydrocarbures lourds contenus dans le gisement et pour entretenir le gaz non utilisé.

Les conditions de marche suivantes ont été prévues pour l'unité :

- Marche sans Turbo-Expander.
- Retraitement du condensat off spec.
- Retraitement du GPL off sepc.

L'usine est constituée de deux trains 10 et 20 dont chaque train assure le traitement de 7,5 millions m³/ jour de gaz brut. Les deux trains ont le même procédé de fonctionnement, pour cela, on va décrire l'un des deux trains.

La figure n°03 décrit le schéma de traitement pour un train de l'unité Hamra.



- a) partie haute pression:

Le gaz brut alimente le train de traitement 10 sous contrôle de pression maintenue à 105 bar et 49 °C, le gaz ensuite est refroidi dans le premier échangeur 10/E-01 jusqu'à 33°C par le gaz sec avant de se diriger vers le ballon séparateur 10/V-01 dans lequel on aura la séparation entre l'eau, les hydrocarbures lourds et le gaz.

Le gaz sortant du ballon 10/V-01 est envoyé à la section de déshydratation gaz afin d'éviter la formation des hydrates. Cette section est constituée de trois déshydrateurs par tamis moléculaires : 10/V-04 A/B/C, deux en service et l'autre en régénération (chauffage par l'huile diathermique dans le réchauffeur 10/E-10). Les tamis utilisés sont de type 4A UI 190 UOP. A la sortie de cette section, la teneur en eau est inférieure à 1 Ppm.

Le gaz provenant de la section de déshydratation est refroidie dans une série d'échangeurs de chaleur (coté tube) gaz brut/hydrocarbures liquides (10/E-03) et gaz brut/gaz sec (10/E-02 et 10/E-04) jusqu'à une température de -2°C avant de passer dans un deuxième ballon de séparation 10/V-05 où on aura une séparation de deux phases (gaz et hydrocarbures liquides).

Le gaz sortant du ballon séparateur 10/V-05 subit une détente (détente isentropique) dans le coté turbine du Turbo-Expander (10/K-01), la pression chute de 97,6 bar jusqu'à 31 bar et la température de -2°C jusqu'à -55°C (source de froid).

Les hydrocarbures liquides condensés suite à cette détente se séparent du gaz dans le séparateur moyen pression 10/V-06.

Le gaz sortant du 10/V-06 passe à travers les échangeurs de chaleur gaz / gaz 10/E-05, 10/E-02 et 10/E-01(coté calandre) pour avoir les températures : -38°C ensuite 5°C et enfin 36°C . Ce dernier sera comprimé dans le coté compresseur du Turbo-Expander (10/K-01) jusqu'à une pression de 40 bar ensuite sera refroidi de 60°C à 55°C à travers l'aéroréfrigérant 10/EA-02. Ce gaz passe par une section de compression où le gaz de vente comprimer de 41 bars à 75 bars et d'autre partie de gaz destiné vers la réinjection est comprimée à une pression de 275 bar en deux étages.

Les hydrocarbures liquides récupérés du slug catcher et du ballon séparateur 10/V-01 passent dans le ballon séparateur 10/V-02 afin d'éliminer l'eau et une faible quantité de gaz qui est utilisée comme gaz combustible (vers unité 120). Le liquide récupéré du ballon 10/V-02 est pompé à travers la pompe 10/P-01 vers un autre ballon 10/S-03 qui est muni d'un filtre pour éliminer les impuretés et la matière en suspension ainsi que de l'eau, ensuite, les hydrocarbures liquides partiellement déshydratés (10 PPM) sortants du 10/S-03 passe dans un déshydrateur liquide à Tamis moléculaires 10/V-03 afin d'éliminer les dernières traces d'eau, la régénération du tamis se fait par un chauffage au niveau de réchauffeur 10/E-11 par l'utilisation d'huile diathermique chaude.

-b) Partie basse pression:

Les hydrocarbures liquides déshydratés provenant du déshydrateur 10/V-03 passent à travers les échangeurs de chaleurs 10/E-13 et 10/E-06 pour être chauffés jusqu'à la température de 98°C avant d'alimenter la colonne 10/C-01 (déethaniseur) au niveau du 24^{ème} plateau.

Les hydrocarbures liquides provenant du ballon séparateur 10/V-05 passent à travers l'échangeur de chaleur 10/E-03 pour être chauffés jusqu'à une

température de 16 °C avant d'alimenter la colonne 10/C-01 au niveau du 20^{ème} plateau.

Les hydrocarbures liquides provenant du ballon séparateur 10/V-06 sont pompés par la pompe 10/P-02 et passent à travers l'échangeur de chaleur 10/E-04 pour être chauffés jusqu'à une température de -5 °C avant d'alimenter la colonne 10/C-01 au niveau du 10^{ème} plateau .

La colonne 10/C-01 est constituée de 40 plateaux à clapet et fonctionne à une pression de 30 bar. La température du sommet est de -9°C et la température du fond est de 160°C.

Le gaz sortant de tête du déethaniseur est partiellement condensé dans l'échangeur de chaleur 10/E-05 pour se séparer du liquide dans le ballon de reflux 10/V-07. La partie liquide sortante du ballon retourne vers la colonne 10/C-01 au niveau du premier plateau comme reflux froid. Une partie du liquide du fond de la colonne passe dans le rebouilleur 10/E-08 coté calandre pour être utiliser en qualité de reflux chaud avant d'être retourné vers la colonne comme reflux chaud, l'élément de chauffage utiliser est le Therminol 66 (l'huile diathermique) provenant de l'unité 141.

La colonne 10/C-02 est constituée de 46 plateaux à clapet, et fonctionne à une pression de 16 bar. La température au sommet de la colonne est de 77 °C et au fond de la colonne est de 208°C.

Les vapeurs de tête du débutaniseur sont condensées au niveau du l'aeroréfrigérant 10/EA-01 pour se diriger vers le ballon de reflux 10 / V-08.

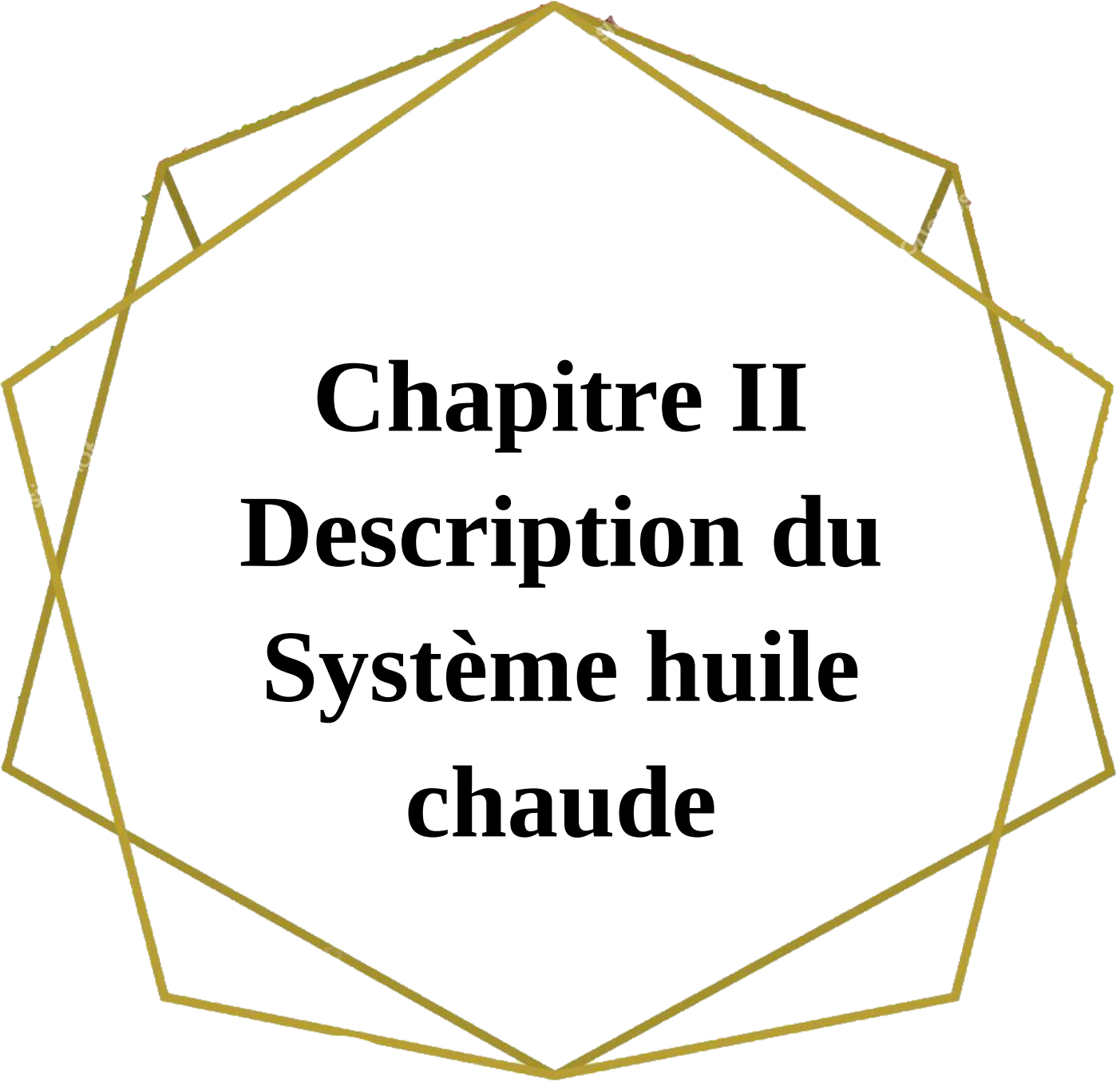
Une partie du liquide est réinjectée dans la colonne au niveau du premier plateau entant que reflux froid, et l'autre partie entant que GPL produit est envoyée vers la section de stockage et de transfert.

Le résidu du débutaniseur est extrait entant que condensât produit après avoir été refroidi dans les échangeurs de chaleur 10/E-07, 10/E-06, l'aeroréfrigérant10/EA-03 et enfin dans l'échangeur 10/E-13.

Le rebouillage est assuré par l'huile chaude provenant du four141/F-01.

La température de stockage du GPL est de 20°C et à une pression de 6,5 bar, la température de stockage du condensât est de 31°C et une pression atmosphérique.

En cas de saturation des sphères de stockage de GPL et il n'y a pas une demande d'expédition, on est obligé de réinjecter le GPL produit vers les puits réinjecteur par une évaporation de 200°C en utilisant comme élément de chauffage le Therminol66 dans le réchauffeur 10/E-15 .



Chapitre II

Description du

Système huile

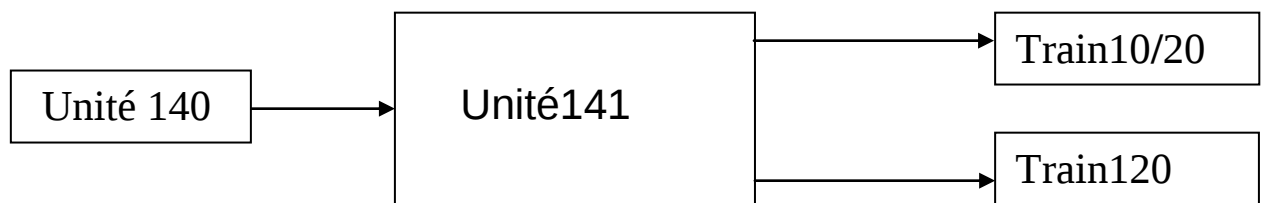
chaude

Chapitre II : Description du Système huile chaude

Le système huile chaude fournit la chaleur nécessaire aux unités de traitement (unité 10/20) et à l'unité de distribution du gaz combustible (unité 120).

Le système huile chaude comprend 03 sections :

- Section huile chaude partie commune (stockage unité 140).
- Section huile chaude train 10 (unité 141).
- Section huile chaude train 20 (unité 142).



L'huile chaude assure l'échange de chaleur dans les équipements suivants :

- 10/E-08 : Rebouilleur du dééthaniseur (10/C-01).
- 10/E-09 : Rebouilleur du spiltter GPL (10 /C-02).
- 10/E-10 : Réchauffeur régénérateur du déshydrateur gaz (10/V-04).
- 10/E-11 : Réchauffeur régénérateur du déshydrateur liquide (10/V-03).
- 10/E-15 : Réchauffeur du GPL en cas de réinjection.
- 120/E-01 : Réchauffeur du gaz combustible.

II.1- Description de circuit et conditions de fonctionnement :

1-1) Description de circuit : (voir annexe n°01).

La boucle de l'huile chaude comprend les équipements suivants :

- Un four de préchauffage de l'huile (141/F-01).
- Un réservoir huile chaude (Le ballon tampon 141/V-01).
- Trois pompes pour la circulation de l'huile à travers les échangeurs de l'unité 10 et de l'unité 120 (141/P-01 A/B/C).
- Deux filtres de l'huile chaude (141/S-01 A /B).
- Un aeroréfrigérant pour le refroidissement de l'huile chaude (141/EA-01).

Le réservoir tampon 141/ V-01 reçoit le retour du Therminol 66 provenant des échangeurs des unités 10 et 120 et une partie de l'huile chaude provenant du four 141/F-01 après un refroidissement par l'aeroréfrigérant 141/EA-01 à une température de 240°C et une pression de 2,5bar.

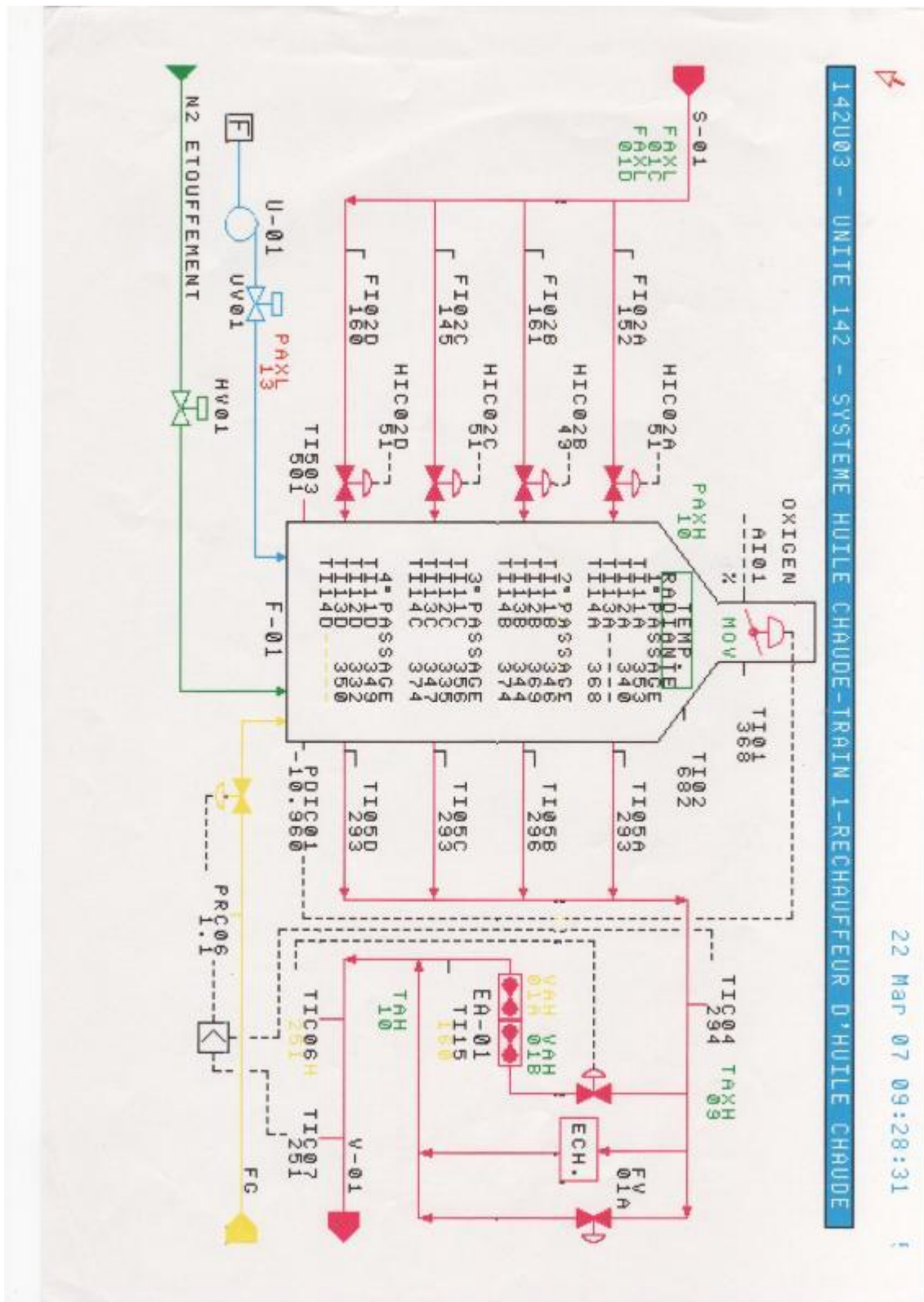
L'aeroréfrigérant est prévu pour garantir une température constante de l'huile chaude dans le réseau de retour vers le réservoir tampon, la température de sortie de EA-01 est réglée par la 141/TIC-06 qui contrôle le débit à travers l'aeroréfrigérant.

L'huile sortant de ballon V-01 est pompée à travers les pompes d'alimentation 141/P-01 A/B/C à une pression de 12 bars après une filtration dans le filtre 141/S-01 A/B afin d'éliminer les particules solides contenant dans l'huile, entre les manifolds de refoulement et aspiration des pompes est installée une prise d'échantillon avec refroidisseur à eau pour vérifier l'état de l'huile en circulation.

L'huile refoulée par les pompes est envoyée sous contrôle de débit FIC-01 vers le four 141/F-01 à une température de 245 °C où elle adsorbe de la chaleur dans la zone de convection d'abord et ensuite dans la zone radiante, la température de sortie est de 300 °C qui est contrôlée par le 141/ TIC-04 A/B/C/D.

Le débit de l'huile Therminol 66 entrée four est contrôlé par l'interrupteur FSL-01 A/B, en cas de bas débit le FSL-01 A/B démarre la pompe de secours, en cas de très bas débit, l'interrupteur FSL-01C/D vas fermer la vanne du gaz combustible UV-02.

L'huile sortie four va aux échangeurs des unités 10 et 120 où elle fournit la chaleur nécessaire pour le fonctionnement normal de l'usine, puis elle retourne au ballon tampon 141/V-01 sous contrôle de température par le régulateur 141 TIC-07. [1]



Le schéma du système d'huile chaude est indiqué dans la figure n°04.

1-2) Caractéristiques et conditions de fonctionnement des divers équipements du système : [1]

1-2-1) Ballon tampon :

Tableau n°05

N° d'appareil	141/V-01
Service	Réservoir de Therminol 66
Type	Verticale
Dimension (mm)	L= 7500 D= 2500
Température (°C)	240
Pression (bar)	3,6
Poids (ton)	12

1-2-2) Pompes :

Tableau n°06

N° d'appareil	141/P-01 (A/B/C)
Service	Circulation de Therminol 66
Type	Centrifuge
Température de l'huile (°C)	240
Pression d'aspiration (bar)	3,3
Pression de refoulement (bar)	12
Débit (m ³ / h)	355

1-2-3) Four :

Tableau n°07

N° d'appareil	141/F-01
Service	Réchauffeur du Therminol 66
Type	Radiant Convection
Chaleur échangée (Kcal /h)	2,76 10 ⁶
Température entrée (°C)	215
Température sortie (°C)	302
Débit (Kg /h)	534 10 ³

1-2-4) aeroréfrigérant :**Tableau n°08**

N° d'appareil	141/EA-01
Service	Refroidissement de Therminol 66
Type	Tirage forcé
Matériaux	Acier en carbone
Température entrée (°C)	302
Température sortie (°C)	200
Débit (Kg /h)	80 10 ³

1-2-5) Les équipements thermiques :

Le débit du Therminol 66 qui travers les échangeurs des unités 10 et 120 est donné dans le tableau suivant :

Tableau n°09 : données process du Therminol 66 dans les équipements Thermiques

N° d'appareil	Débit du Therminol 66 (Kg/h)	Température entrée (Sortie four) (°C)	Température de sortie (°C)
10 /E-08	124,52 10 ³	300	200
10/E-09	163,55 10 ³	300	230
10/E-10	108 10 ³	300	225
10/E-11	43,48 10 ³	300	210
10/E-15	43,45 10 ³	300	200
120/E-01	9,234 10 ³	300	205

Remarques :

- 1- Le débit du Therminol 66 varie selon les besoins en calories, sous contrôle des vannes de régulation du débit “ FIC” et de température “ TIC”.
- 2- Pour les réchauffeurs 10/E-10 et 10/E-11, le Therminol 66 est utilisé seulement pendant la régénération des déshydrateurs gaz et liquide (5 X 3 h pour le gaz et 5,8 X 2 h pour le liquide -rampe de chauffage -).
- 3- Le besoin de chauffe pour le réchauffeur de GPL varie selon la demande (cas de la réinjection du GPL).
- 4- L'aeroréfrigérant 141/EA-01 permet de régler la température d'entrée de four.

II.2-Propriétés et caractéristiques du Therminol 66 : [2]

Le Therminol 66 est un liquide huileux caloporteur synthétique, utilisée des plages de température de 0 jusqu'à 345°C. Elle est spécialement formulée pour offrir une longue durée de service et une excellente efficacité thermique.

Le Therminol 66 est connue à l'industrie par le nom huile diathermique et sa composition a été soigneusement pour minimiser les déterminée risques de formation de fraction de dégradation lourdes et l'encrassement des tuyauteries, si l'installation de chauffe est correctement conçue et si l'exploitation respecte les limites de température préconisées pour ce fluide.

2-1) Propriétés physico-chimique du Therminol 66 : Tableau n°10

Composition	Terphényle hydrogéné
Aspect	Liquide claire et jaune pâle
Température max dans la veine du fluide	345°C
Température max au contact de la paroi chaude	375°C
La viscosité cinématique à 40 °C à 100 °C	29,64 cst 3,77 cst
La masse volumique à 15°C	1011 kg/m ³
Point d'éclaire	170 °C
Point de feu	216 °C
Température auto inflammation	399°C
Point d'écoulement	-32°C
Point d'ébullition (à 1atm)	359°C
Coefficient de dilatation	0,0009 /°C
Teneur en eau	<150 ppm
Acidité total	< 0,02 mg KOH /g
Teneur en chlore	< 10 ppm
Corrosion en cuivre	<< 1a
Masse moléculaire moyenne	252

2-2) Evolution des propriétés thermiques du Therminol 66 en fonction de la température :

Tableau n°11

T° (°C)	Masse Volumique (kg/m ³)	Conductivité thermique (W/m,k)	Chaleur Massique (kj/kg,k)	VISCOSITE		pression de vapeur (absolue) Kpa
				Dynamique (mpa.s)	Cinématique (mm ² /s)	
0	1021,5	0,118	1,495	1324,9	1297	-
10	1014,9	0,118	1,529	344,26	339,2	-
20	1008,4	0,118	1,562	123,47	122,45	-
30	1001,8	0,117	1,596	55,6	55,51	-
40	995,2	0,117	1,63	29,5	29,64	-
50	988,6	0,116	1,665	17,64	17,84	-
60	981,9	0,116	1,699	11,53	11,74	-
70	975,2	0,115	1,733	8,06	8,26	0,01
80	968,5	0,115	1,768	5,93	6,12	0,02
90	961,8	0,114	1,803	4,55	4,73	0,03
100	955	0,114	1,837	3,6	3,77	0,05
110	948,2	0,113	1,873	2,92	3,08	0,08
120	941,4	0,112	1,08	2,42	2,58	0,12
130	934,5	0,111	1,943	2,05	2,19	0,18
140	927,6	0,111	1,978	1,75	1,89	0,27
150	920,6	0,11	2,014	1,52	1,65	0,4
160	913,6	0,109	2,05	1,34	1,46	0,58
170	906,6	0,108	2,086	1,18	1,3	0,83
180	899,5	0,107	2,122	1,06	1,17	1,17
190	892,3	0,107	2,158	0,95	1,06	1,62

200	885,1	0,106	2,195	0,86	0,97	2,23
210	877,8	0,105	2,231	0,78	0,89	3,02
220	870,4	0,104	2,268	0,72	0,82	4,06
230	863	0,103	2,305	0,66	0,77	5,39
240	855,5	0,102	2,342	0,61	0,71	7,1
250	847,9	0,1	2,379	0,57	0,67	9,25
260	840,3	0,099	2,417	0,53	0,63	11,95
270	832,5	0,098	2,455	0,49	0,59	15,31
280	824,6	0,097	2,492	0,46	0,56	19,46
290	816,6	0,096	2,531	0,44	0,54	24,55
300	808,5	0,095	2,569	0,41	0,51	30,73
310	800,3	0,093	2,608	0,39	0,49	38,22
320	792	0,093	2,647	0,37	0,47	47,2
330	783,5	0,091	2,686	0,35	0,45	57,94
340	774,8	0,089	2,726	0,34	0,43	70,68
350	765,9	0,088	2,766	0,32	0,42	85,74
360	756,9	0,086	2,806	0,31	0,41	103,4
370	747,7	0,085	2,847	0,3	0,39	124,1
380	738,2	0,084	2,889	0,28	0,38	148,1

Equations :

Masse volumique (Kg/m^3) = - 0,614254 * T ($^{\circ}\text{C}$) – 0,000321* T² ($^{\circ}\text{C}$) + 1020,62.

Chaleur massique (Kj/Kg.K) = 0,003313* T($^{\circ}\text{C}$) +0,0000008970785 * T² ($^{\circ}\text{C}$) + 1,496005.

Conductivité thermique (W/m.K) = -0,000033* T ($^{\circ}\text{C}$) -0 ,00000015* T² ($^{\circ}\text{C}$) + 0,118294.

Viscosité cinématique (mm^2/s) = $e^{\left(\frac{586,375}{T(^{\circ}\text{C})+62,5}\right)-2,2809}$

$$\text{Pression de vapeur (Kpa)} = e^{\left(\frac{-909451}{T(^{\circ}\text{C})+340}\right)+17,6371}$$

Les figures 05,06 ,07et 08 donnent l'évolution de ces propriétés de transfert thermiques en fonction de la température.

Figure n°05 :

Variation de la masse volumique du Therminol 66 en fonction de la température.

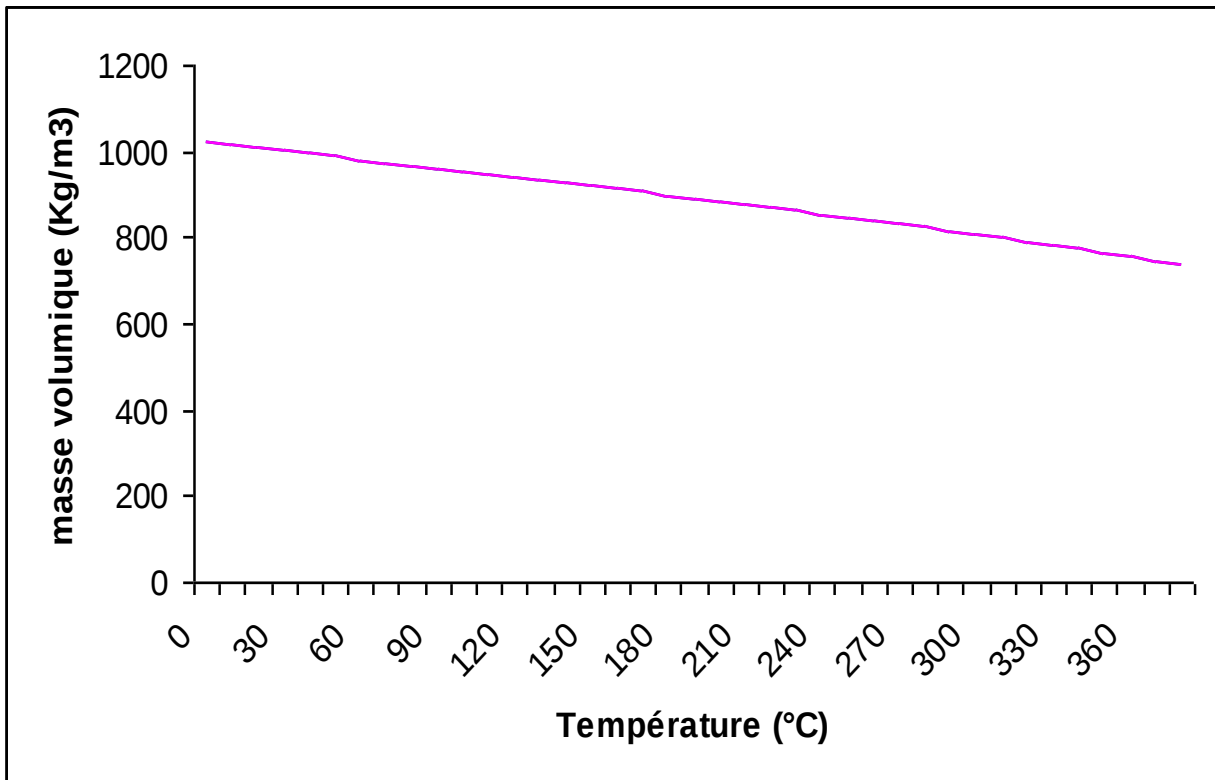


Figure 06 :

Variation de la conductivité thermique du Therminol 66 en fonction de la température.

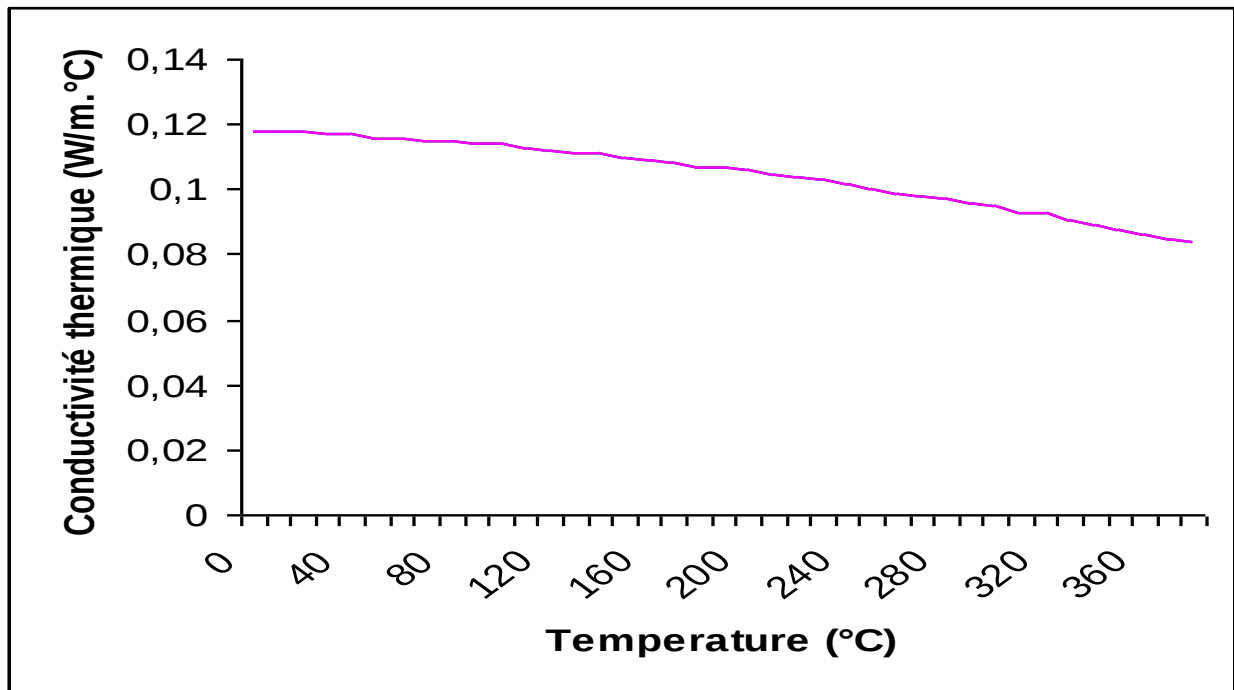


Figure 07 :

Variation de la chaleur massique du Therminol 66 en fonction de la température.

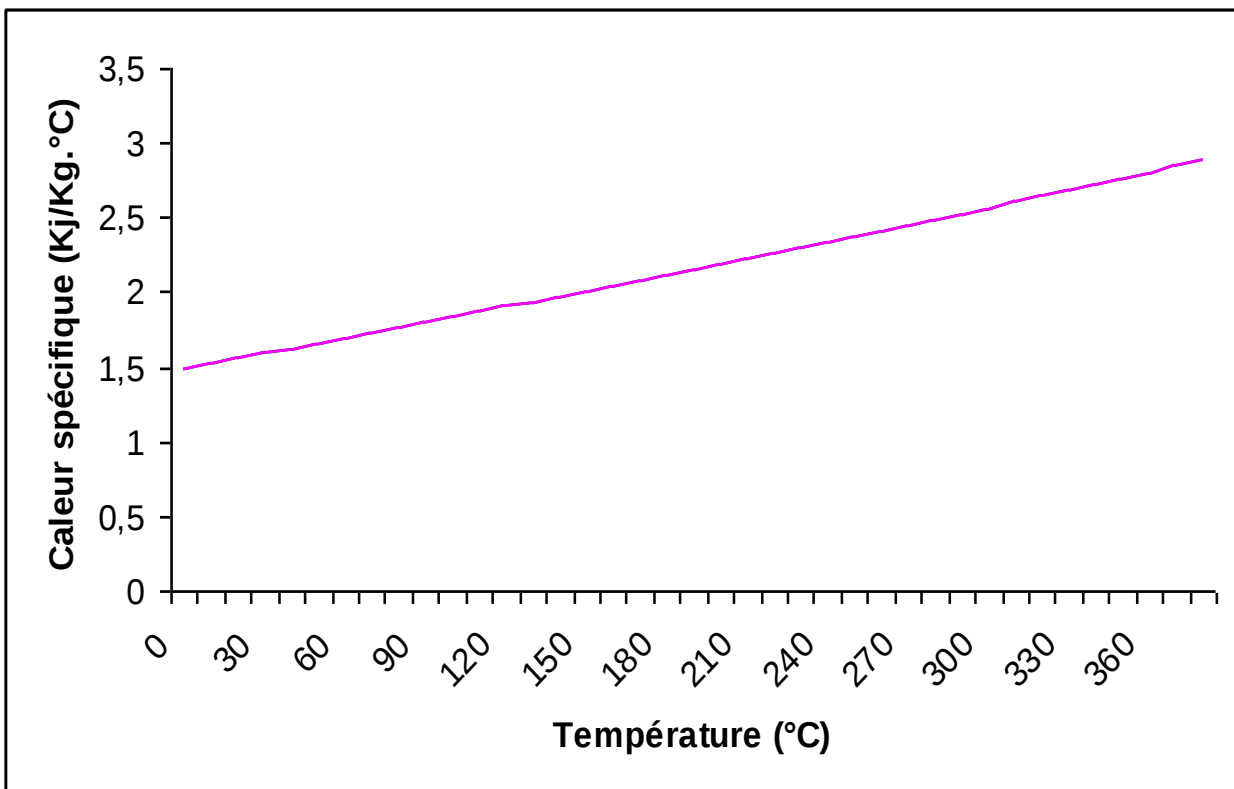
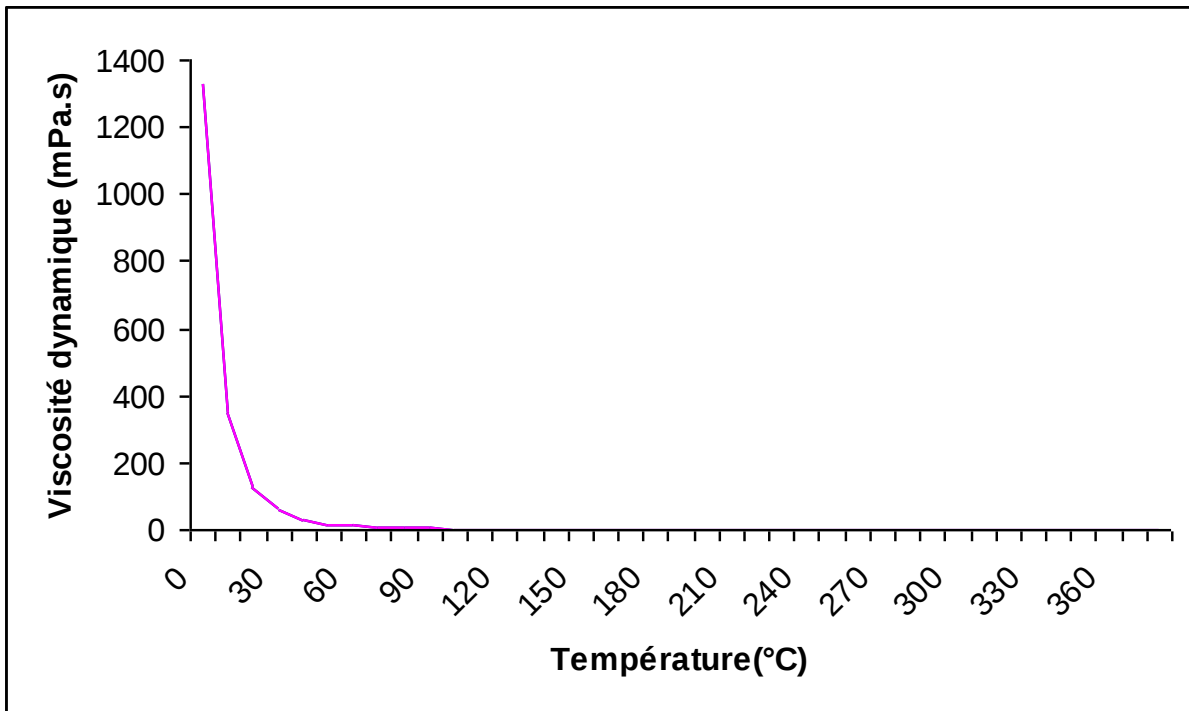
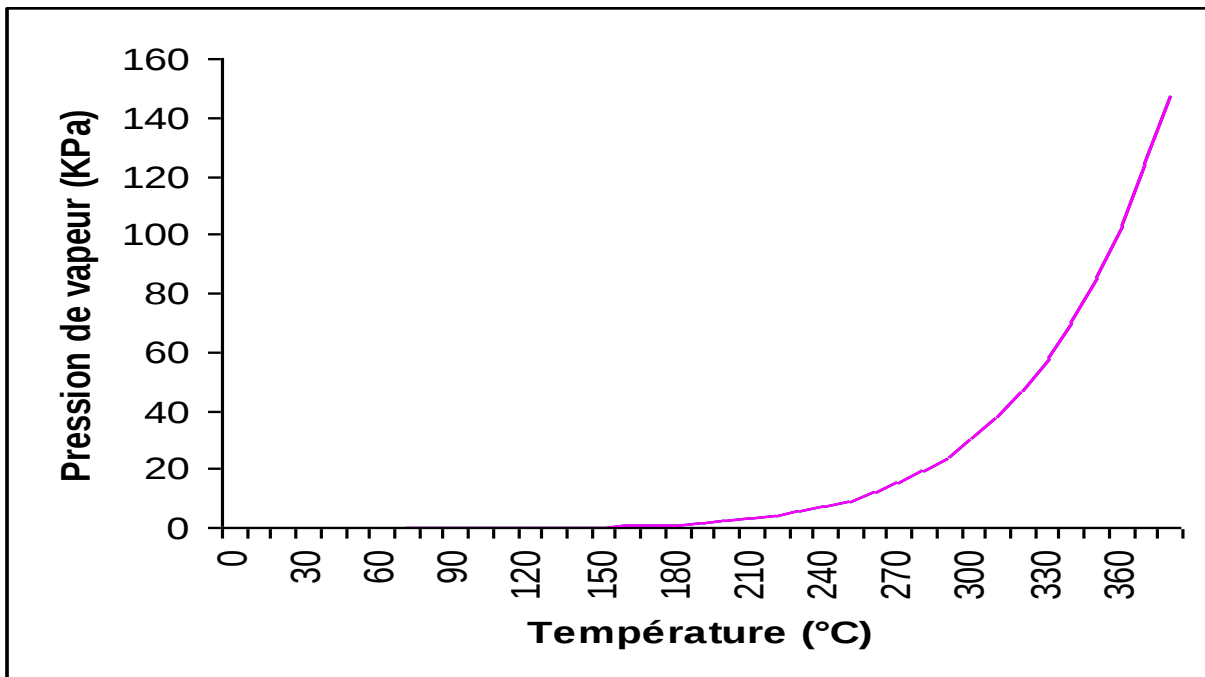


Figure 08 :

Variation de la viscosité dynamique du Therminol 66 en fonction de la température.

**Figure 09 :**

Variation de la pression de vapeur du Therminol 66 en fonction de la température.



2-3) Application du Therminol 66 : [3]

Therminol 66 est utilisé dans les systèmes caloporteurs des industries suivantes :

- Chimie
- Huile et goudron
- Plastic et caoutchouc
- Aliments
- Papeteries et cartonnage

Si la température du fluide au niveau de vase d'expansion est supérieure à 50°C le circuit devra être placé sous azote pour réduire l'oxydation du fluide.

II.3-Système des drainages : [1]

Le système de récolte des drainages de l'huile diathermique a été dimensionné sur la

-capacité opérationnelle du ballon de vidange 7m³

-capacité opérationnelle de la pompe 15m³

Le système a été réalisé pour récupérer l'huile chaude contenue dans les lignes et les équipements de l'unité 141 et dans les lignes et les échangeurs des unités 10 et 20.

Le système de récolte des drainages de l'huile chaude comprend :

- un collecteur de récolte des drainages.
- un réservoir d'accumulation des drainages.
- une pompe de transfert des drainages (P-02).

Les drainages sont collectés par gravité dans le réservoir d'accumulation enterré. L'huile chaude drainée peut être envoyée soit vers le stockage de l'huile chaude T-01 (Température de l'huile < 65°C) soit vers le réservoir tampon V-01 (température de l'huile < 200°C).

L'interrupteur TSXH-08 installé sur la ligne vers le stockage arrête la pompe si la température atteint 65°C.

La température de l'huile dans le réservoir des drainages est indiquée par le TI-506.

Le drainage /arrêt de la pompe de transfert est manuel et local.

L'interrupteur LSXL-04 arrête la pompe si le niveau, dans le V-02, atteint au minimum niveau (ceci sert à protéger la pompe) tandis que l'interrupteur de haut niveau LSXH-05 ferme la vanne installée du à l'entrée du V-02.

La pompe peut être arrêtée aussi Via DCS (HS-P02).

Sur le réservoir de drainage V-02 il est prévu :

- une petite injection d'azote pour garantir une pression positive.
- une vanne autorégulatrice (PCV-525 à 0,2bar eff) avec la décharge du gaz vers l'atmosphère.
- une soupape de sécurité (PSV-O4 à 5bar eff) avec la décharge du gaz vers l'atmosphère.



Chapitre III : Les fluides caloporteurs

Chapitre III : Les fluides caloporteurs

III.1 - Définition d'un fluide caloporteur : [4]

Les processus de production nécessitent le chauffage d'un produit à des températures exigées par le procédé, pour ce la, deux modes de Les processus de production nécessitent le chauffage d'un produit chauffage peuvent être identifiés :

- Le produit est chauffé directement par des gaz de combustion, par des résistances électriques, ou chauffage par rayonnement (brûleurs).
- Le produit est chauffé indirectement, dans ce cas la chaleur soit obtenue par combustion soit dans une chaudière ou des fours (boucles de chauffage), le fluide circulant dans la circuit ou la boucle peut alors jouer plusieurs rôles. Lorsque ce fluide effectue un, simple transport de chaleur, on le dit **fluide caloporteur**.

III.2-Critères de choix des fluides caloporteurs : [4]

Le choix de fluides caloporteurs est en fonction de plusieurs facteurs, qui nous permet de choisir le bon fluide à utiliser, les principaux facteurs sont :

2-1) Critères liés au domaine d'utilisation du fluide :

Le premier critère de choix d'un fluide caloporteur est basé sur le domaine de température d'utilisation, c'est-à-dire la valeur minimale et maximale d'utilisation.

- La valeur minimale d'utilisation est la température de fusion, elle représente évidemment une limite à ne pas dépasser. Dans de nombreux cas pratiques, on préfère utiliser le seuil de pompabilité, lorsque celui-ci est connu : c'est la température au-dessous de laquelle il est impossible d'utiliser une pompe centrifuge, ce qui correspond à une valeur limite de la viscosité cinématique de $500 \text{ mm}^2 / \text{S}$.

- La valeur maximale d'utilisation est conditionnée par deux paramètres distincts :

La pression maximale de fonctionnement du circuit contenant le fluide qui détermine la température de saturation maximale admissible. Un fluide présentant une basse pression de saturation permet d'éviter des constructions coûteuses et de limiter les contraintes réglementaires associées aux dispositifs sous pression.

Le seuil de température de décomposition qui est un facteur essentiel pour certains fluides comme les fluides organiques dont la stabilité thermique est limitée, cette connaissance est nécessaire pour limiter les risques

d'encrassement des parois d'échangeur, augmenter la durée de vie du fluide et limiter les risques d'incendie liés à la formation de produit plus volatils.

2-2) Critères liés à l'exploitation de l'installation :

Ces critères correspondent aux limitations liées à l'utilisation et à l'exploitation, ces limitations sont de différents ordres.

- Tenue des performances dans le temps de l'installation : l'absence d'agressivité des fluides vis-à-vis des matériaux courants, limite les risques de corrosion des équipements et d'encrassement des surfaces d'échange.
- Les risques d'incendie sont caractérisés par le point d'éclair ou le point d'inflammabilité et par le point de feu ou de température de combustion, ces risques peuvent présenter pour les huiles synthétiques de types aromatiques.
- Les risques d'explosion sont caractérisés par les limites inférieures et supérieures
- Les risques toxiques.

2-3) Critères technico-économiques liés à l'installation recevant les fluides caloporteurs :

Les coûts associés à l'installation recevant les fluides sont de deux types :

- Les coûts d'investissement : dans le cas d'un circuit recevant un fluide caloporteur, les principaux organes de circuit sont les dispositifs de chauffe, les pompes, l'échangeur qui permet de transfert de chaleur au produit, les éléments de tuyauterie.
- Les coûts d'exploitation : ceux-ci sont essentiellement liés aux dépenses énergétiques de l'installation mais également au coût de fluide caloporteur qui peut être soit régulièrement retraité soit vidangé et renouvelé.

2-4) Critère de dimensionnement :

Les diamètres des canalisations et des tuyauteries ainsi la taille de la pompe sont déterminés par le pouvoir caloporteur du fluide. Celui est défini comme l'aptitude au transport de l'énergie thermique du fluide. La puissance thermique (Q) transportée est évaluée aisément à partir du débit volumique du fluide Q_v , comme l'expriment les relations suivantes.

- Lorsque le fluide est en simple phase et que le transfert est réalisé par chaleur sensible, la puissance thermique est donnée par :

$$Q = \rho Q_v C_p \Delta T \quad (\text{kJ/h})$$

Avec :

C_p : chaleur spécifique de fluide (Kj/Kg°C).

ρ : Masse volumique de fluide (kg/m³).

ΔT : écart de température entre l'entrée et la sortie de dispositif de Chauffage (°C).

Q_v : Débit volumique du fluide (m^3/h).

Le pouvoir caloporteur qui représente la puissance thermique transportée par unité de débit volumique et d'écart de température est alors égal à : ρC_p

- Lorsque le fluide est en double phase et que le transfert est réalisé par chaleur latente, la puissance thermique est donnée par :

$$Q = \rho Q_v h \Delta X$$

Avec :

h : enthalpie massique de changement de phase.

ΔX : variation de titre massique de vapeur entre l'entrée et la sortie de dispositif de chauffage.

Le pouvoir caloporteur est donnée par : ρh

Les surfaces d'échange des échangeurs de chaleur sont déterminées par le pouvoir caloporteur de fluide, le fluide caloporteur influe sur le coefficient globale de transfert de chaleur « h » par l'intermédiaire du coefficient d'échange associé « h_{fc} » à ce fluide et de coefficient d'échange de produit ou de fluide à chauffer « h_p » ainsi qu'à d'éventuelle résistance thermique « R » :

$$\frac{1}{h} = \frac{1}{h_{fc}} + \frac{1}{h_p} + R$$

La surface d'échange ($A_{éch}$) de l'échangeur est déduite de la puissance thermique « Q » et de l'écart de température moyen « ΔTLM » des deux fluides :

$$A_{éch} = \frac{Q}{U_s \Delta TLM}$$

Seul le coefficient global de transfert (U_s) entre la paroi d'échange et le fluide caloporteur est varié suivant leurs propriétés physiques.

2-5) Critères énergétiques :

Comme nous l'avons signalé précédemment, évaluer la dépense énergétique d'un dispositif utilisant un fluide caloporteur est un exercice délicat car cette dépense doit intégrer le terme direct (puissance de pompage pour un circuit de chauffe). Nous privilégierons un critère de type coefficient de performance « C », qui s'exprime par le rapport entre la puissance thermique fournie au produit (P_r) et la puissance de pompage (P_p) nécessaire à la circulation de fluide caloporteur dans l'échangeur fluide/produit et cela à même vitesse de

circulation du fluide, même écart de température entre le fluide caloporteur et géométrie d'échangeur inchangée :

$$C = P_r / P_p.$$

Si le coefficient de transfert entre le produit et l'échangeur (h_p) est très supérieur au coefficient de transfert entre le caloporteur et l'échangeur (h_{fc}) et que les résistances thermiques soit négligeables, alors le coefficient C se ramène à :

$$C = \frac{h_{fc} \cdot \Delta TLM \cdot A_{ech}}{P_p}$$

La puissance de pompage « P_p » est égale au produit du débit volumique du fluide et de la perte de pression « ΔP » aux bornes de l'échangeur :

$$P_p = Q_v \cdot \Delta P$$

III.3- Propriétés des fluides caloporteurs et leurs principales applications :

Les principaux fluides caloporteurs sont les **gaz** sous forme d'azote, d'hélium, d'air, de dioxyde de carbone et de vapeur **d'eau** caractérisé par un médiocre pouvoir calovecteur et caloporteur : toutefois, leur grande disponibilité pour certains et leurs applications à très haute température pour d'autres en font des fluides couramment utilisés dans les procédés industriels.

Pour des procédés industriels fonctionnant jusqu'à des températures de 350°C, Les **fluides organiques** sous forme d'huile minérale ou synthétique peuvent trouver de larges applications. Les **fluides halogénés** de type PFC ou HFE trouvent des usages où leur rigidité diélectrique et leur volatilité s'appliquent à des procédés de refroidissement ou de production en électronique. Les usages à plus haute température imposent des fluides caloporteurs de type **sels fondus** voire **métaux liquides** dont la mise en œuvre reste délicate malgré des propriétés physiques particulièrement favorables. [4]

3-1) Gaz :

3-1-1) Principaux gaz caloporteurs, propriétés physico-chimiques :

L'azote, l'air, l'hélium, le dioxyde de carbone et la vapeur d'eau surchauffée sont les principaux gaz caloporteurs. Ce sont, à l'exception de l'air, des composés simples. Par ailleurs, les gaz de combustion, lorsqu'ils sont transportés hors de la chaudière ou de four pour y céder leur chaleur sensible ou latente, jouent le rôle de fluide caloporteur contenant une forte proportion d'azote.

Les principaux gaz caloporteurs sont inflammables, non dangereux pour la santé en concentration modérée et stable sur un grand domaine de température et de pression.

- **L'hélium**, par sa masse molaire très faible, présente une masse volumique très différente des autres gaz caloporteurs (0.18 kg/m^3).il possède une grande capacité thermique massique (5 J/kg.K) soit environ six fois celle de l'air.
- **Le dioxyde de carbone**, par opposition à l'hélium, est très dense (2 kg/m^3) il permet d'offrir une bonne capacité thermique volumique ($1500 \text{ J/m}^3.\text{K}$), à basse température son usage est limité par sa température de point triple qui se situe à $-78,9^\circ\text{C}$ à la pression atmosphérique.
- **L'air**, par sa disponibilité, est le caloporteur le plus fréquemment utilisé malgré des caractéristiques thermique médiocres ($C_p=1 \text{ J/kg.K}$) et ($\lambda=0.024 \text{ W/m.K}$).
- **L'azote**, est le constituant principale de l'air. De ce fait, sa disponibilité est importante et ses propriétés sont voisines de celles de l'air. Son emploi se justifie pour des applications thermiques où le fluide ne doit pas être oxydant
- **La vapeur d'eau surchauffée (ou vapeur sèche)**, est obtenue par élévation de la température de l'eau de plusieurs dizaines de degrés au-dessus de la température de saturation. Elle présente une grande disponibilité mais, par contre peut s'utiliser lorsque le fluide ne doit pas être oxydant. Ce fluide (ve) reste de mise en œuvre plus complexe que l'air de par de risque de condensation sur les parois qu'il engendre et de la corrosion.

3-1-2) Principales applications des gaz comme fluide caloporteurs :

L'usage de l'**air** comme fluide caloporteur se trouve dans les domaines du séchage et du chauffage dans une gamme de température très large (0 à 1000°C) : il constitue sans conteste le gaz caloporteur le plus courant.

L'azote s'utilise évidemment dans la cryogénie mais aussi dans les dispositifs de chauffage sous atmosphère neutre dans une gamme de température également très large.

L'hélium et le **Co₂** trouvent des applications dans certains réacteurs nucléaires (exemple de réacteur graphite gaz).

La **vapeur d'eau surchauffée** a des principaux dans le domaine du séchage de produits alimentaires, la stérilisation et les procédés de stripping.

3 -2) Eau :

L'eau peut se présenter, comme fluide caloporteur, sous ses deux phases : liquide et vapeur. Sous forme liquide, compte tenu de ses propriétés, l'eau constitue un excellent caloporteur que nous utiliserons comme fluide de référence dans les comparaisons. Son usage à l'état pur, est limité à des températures supérieures à $0,01^\circ\text{C}$ et inférieure à 300°C , compte tenu des pressions importantes de saturation et des coûts induits pour l'installation que

ces températures élevées engendrent. L'eau naturelle doit être soigneusement filtrée et purifiée pour une utilisation industrielle.

3-2-1) Principales propriétés physico-chimiques :

Parmi les caractéristiques thermodynamiques remarquables de l'eau, citons un point de triple à 0.01 °C et un point critique très élevé $T_c = 374.15$ °C et $P_c = 21.76$ Mpa. En phase liquide l'eau présente une forte conductivité thermique (supérieure à 0.6 W/m.k), une faible viscosité (0.001 pas à 20 °C) et une capacité thermique massique supérieure à celle de tous les fluides caloporteurs (4200 J/kg.k), mais il y a des inconvénients :

- L'**encrassement particulaire** peut être largement réduit par une filtration appropriée.
- L'**entartrage** carbonaté (CaCO_3), sulfaté (CaSO_4) incrustant et dur ou siliceux (SiO_2 , SiO_3Ca , SiO_3mg ,...).)
- La **corrosion** résulte principalement de l'attaque de l'acier par l'oxygène et le gaz carbonique dissous.

3-2-2) Principales applications de l'eau sous forme liquide:

Suivant le niveau de température, l'eau liquide a des applications diverses :

- L'eau chaude de 25 à 100 °C et à une pression proche de la pression atmosphérique est utilisée pour le chauffage dans l'habitat et l'agroalimentaire.
- Pour les applications à températures supérieures à 100°C, l'eau est dite surchauffée : elle est utilisée sous pression et son emploi nécessite une tenue des circuits à la pression dépendante de la température maximale du fluide. Les principaux usages sont, pour des températures supérieures à 300 °C, un usage également important concerne les réseaux urbains de chauffage.

3-2-3) Principales applications de l'eau sous forme vapeur saturée :

La vapeur d'eau saturée permet de transférer la chaleur sous forme de chaleur latente, pour limiter le diamètre des tuyauteries, il est préférable d'augmenter la pression de vapeur.

3-3) Fluides organiques :

Les fluides caloporteurs organiques peuvent être subdivisés en trois catégories :

- Les huiles minérales ou les hydrocarbures d'origines pétrolières.
- Les huiles synthétiques comprenant principalement les aromatiques et les silicones.
- Les fluides halogénés de types PFC (perfluorocarbure), PFPE (perfluoropolytéther) ou plus récemment, HFE (hydrofluoréther).

3-3-1) Huiles minérales:

Les huiles minérales extraites des différentes régions du globe ont des compositions très variées. Elles peuvent être classées d'après leurs constituants principaux : on distingue en effet des huiles brutes paraffiniques, les huiles brutes aromatiques et les huiles naphthéniques.

Les huiles minérales commerciales sont généralement à caractère naphthénique : une répartition moléculaire étroite, obtenue par distillation, permet d'ajuster au mieux les propriétés physiques suivant l'utilisation. Le point d'éclair des huiles minérales varie entre 200 et 270 °C. Ces fluides ne sont pratiquement pas toxiques et sont bon marché. En contrepartie, leur tension de vapeur, leur point de feu et leur stabilité thermique limitent leur utilisation au-dessous de 300 °C.

3-3-2) Les huiles synthétiques:

Ces fluides sont répartis essentiellement en deux groupes :

- Les hydrocarbures aromatiques (alkylbenzène et polyphényles hydrogénés).
- Les huiles silicones.

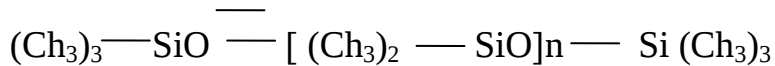
❖ **Les hydrocarbures aromatiques** présentent une stabilité thermique élevée, jusqu'à des températures proches de 400 °C, liée à la forte énergie de cohésion du groupement phényle. Ce type de fluide permet de couvrir un large domaine d'applications compris entre -50°C et 400°C. on peut distinguer deux catégories de produits :

- Les fluides dont la température d'ébullition est inférieure à la température maximale d'utilisation nécessitent une pressurisation des circuits à haute température. S'ils permettent d'atteindre des températures élevées (supérieure à 400°C), certains d'entre eux ont un seuil de pompabilité supérieure à la température ambiante nécessitant des dispositifs de mise hors gel des installations.
- Les fluides dont la température d'ébullition est supérieure à la température d'utilisation et pour lesquels la pressurisation des circuits est inutile (alkyle benzène, Poly phényles).

Pour ces fluides, le point d'éclair varie entre 100 et 200 °C suivant la composition. De ce point de vue, ces fluides présentent plus de risques d'incendie que les huiles minérales.

Quant à la toxicité, les fluides aromatiques sont plus agressifs que les huiles minérales tant par ingestion que par le contact avec la peau.

❖ **Les huiles silicones** utilisées comme fluides caloporteurs sont, pour la plupart, des huiles polyméthylsioxanes linéaires de type :



La masse moléculaire moyenne ainsi que la viscosité de l'huile augmente avec le degré de polymérisation « n ». Ainsi, pour n=9, M=828, viscosité =10 cSt et pour n=64, M=5000 et viscosité = 100 cst.

Les huiles silicones présentent plusieurs intérêts :

- Elles couvrent de plus grands domaines de température que les huiles minérales ou aromatiques. Ainsi, une huile polydiméthylsiloxane peut être utilisée de -40 à 400 °C.
- Contrairement aux huiles minérales, la variation de la viscosité des huiles silicones avec la température est faible.

Vis-à-vis des risques d'incendie, le point d'éclaire et le point de feu varient fortement avec la masse moléculaire moyenne (certains produits présentent un point d'éclaire proche de 30 °C, d'autre dépassent 200 °C. toutefois, au dessus de 300 °C) la plupart des huiles silicones commencent à se décomposer en formant des produits volatils plus inflammables, on recommande généralement d'utiliser ces fluides jusqu'à 400 °C en prévoyant des procédures de ventilation périodique.

3-3-3) Fluides halogénés :

Les besoins de l'industrie électrique pour des fluides thermiques inertes, stable, à faible tension superficielle et à constante diélectrique très élevée pour les procédés de production mais, également, pour le refroidissement des composants dissipateurs de chaleur ont amené au développement et à l'utilisation de fluides halogénés de divers types.

- Les CFC (chlorofluorocarbures) et HCFC (hydrochlorofluorocarbures).
- Les fluides PFC (perfluorocarbures).
- Les fluides dits HFE (hydrooréthers).

Le mode d'utilisation des fluides halogénés étant généralement l'évaporation à la pression ambiante pour assurer le refroidissement de l'élément dissipateur de chaleur, les températures limite d'utilisation de ces fluides sont :

- pour la température maximale, la température d'ébullition à la pression atmosphérique. Suivant les molécules retenues, cette température évolue entre valeur proche de 30 °C. Pour des usage de pression, les températures maximales sont imposées par la stabilité chimiques (120 à 150 °C suivant les fluides).

- pour la température minimale, la température de seuil de pompabilité qui évolue entre -101 °C et -60 °C.

3-3-4) Domaine d'application et choix d'un fluide organique :

Par leur large domaine d'utilisation, les fluides organiques trouvent des nombreuses applications (plasturgie, centrales électriques, génie chimique, refroidissement d'équipements électrotechniques....etc.). La plupart des installations thermiques fonctionnent en circuit fermé pour éviter le vieillissement par oxydation ou les émissions de vapeurs susceptibles d'être inflammable ou d'avoir un impact environnemental néfaste.

Il est clair que le choix d'un fluide pour une application donnée est le résultat d'un compromis entre de nombreux critères dont l'importance est variable suivant les marchés visés.

Dans le tableau suivant, nous rappelons les principales propriétés des fluides organiques :

Tableau n°12 : Principaux critères de choix des fluides organiques

Critère de sélection	Huile minérale	Huile synthétique		Fluide de synthèse halogéné (PFC, CFC, HCFC et HFE).
		Huile aromatique	Huile silicone	
Stabilité thermique	< 330 °C	<430 °C	<400 °C	<200°C
Point éclair (°C)	200 à 280	100 à 200	40 à 256	inflammable
Domaine et état normal d'utilisation	-20/300 °C liquide	-50/400 °C liquide	-60/400 °C liquide	-80/200 °C liquide liquide/ vapeur
Domaine industriel d'application	- chauffage indirect de liquide ou de polymères. - traçage de tuyauteries. - système énergétique. -récupération d'énergie. -séchage et chauffage de matériaux.			
Pouvoir	Pouvoir caloporteur dégradé par rapport à l'eau (2			

caloporteur (ρC_p).	fois moindre, en moyenne).			
Coefficient de performance énergétique	le Coefficient de performance énergétique de deux ordres de grandeur inférieurs à ceux de l'eau. Différenciation entre fluides organiques par les valeurs de viscosité.			
Toxicité	Faible	Eviter l'inhalation et le contact avec la peau	Faible	Faible
Inflammabilité	Faible	Faible à moyenne	Moyenne à élevée	Aucune
Effets environnementaux	Risque de rejet ou fuite accidentelle à l'égout ou dans les soles.			
Compatibilité avec les matériaux	- bonne avec les métaux - variable avec les polymères et caoutchoucs			Très bonne avec tous les métaux
Solubilité de l'eau	Faible	Faible	Très faible	Très faible

3-4) Sels fondus :

3-4-1) Principaux Sels fondus, propriétés physico-chimiques :

Les sels fondus les plus courants sont formés de nitrite de sodium (NaNO_2), de nitrate de sodium (NaNO_3) et de nitrate de potassium (KNO_3). Leurs principaux avantages sont de pouvoir fonctionner à la pression atmosphérique pour des températures comprises entre 150 et 550 °C. Pris séparément, ces sels ne sont liquides qu'au-dessus de 300 °C, mais on peut réaliser des eutectiques qui présentent des points de fusion sensiblement plus bas.

Les mélanges les plus courants sont :

- Un mélange de 40% de nitrite de sodium, de 53% de nitrate de potassium et de 7% de nitrate de sodium.

Ce mélange, que l'on désigne par HTS1 (HTS : Heat Transfert Salt), se présente sous forme de granulés blancs à l'état solide et d'un liquide jaune pâle au-dessus de son point de fusion qui se situe à 142 °C. Utilisé entre 150 et 450°C, ce mélange est parfaitement stable, de 450 à 550°C, une évolution lente se produit par pyrolyse de NaNO_2 qui donne NaNO_3 . Cette transformation génère une

augmentation sensible de la température de fusion. Au-dessus de 800°C, cette réaction est suffisamment rapide pour rendre toute utilisation impossible.

- Un mélange de 45% de NaNO_2 et 55% de KNO_3 désigné par HTS2, il présente des propriétés au fluide HTS1.

S'ils présentent comme avantage majeur par rapport aux fluides organiques d'atteindre des niveaux de température supérieures à 500°C, les sels fondus présentent aussi quelques limites qu'il est nécessaire de rappeler :

-Lors de la fusion du sel, une expansion importante peut être notée, cela impose des précautions quant au démarrage des installations.

-Certains gaz comme le CO_2 ou la vapeur d'eau peuvent être dissous dans ces sels et former des carbonates et des hydroxydes insolubles.

- A haute température ($> 400^\circ\text{C}$), ces sels sont corrosifs et il est nécessaire d'utiliser des aciers au chrome ou des aciers austénitiques au chrome-nikel

- Les propriétés physiques de ces sels en font de bons caloporteurs du point de vue performances énergétiques.

Pour le HTS1, la masse volumique élevée (200 Kg/m^3 à 150°C et 1650 Kg/m^3 à 600°C) combinée avec une capacité thermique de 1560 J/Kg.K , et un pouvoir caloporteur largement supérieur à ceux des fluides organiques et 25% inférieur à celui de l'eau. La conductivité thermique de $0,3 \text{ W/m.K}$ et une viscosité comprise entre $2,5.10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ à 150°C et $0,8.10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ à 500°C .

Par ailleurs, ces fluides ne présentent pas de caractère toxiques ni d'inflammabilité.

3-4-2) Principales applications des sels fondus comme fluides caloporteurs :

Les applications des sels fondus sont très spécifiques, elles concernent des applications à haute température comme le stockage thermique dans les centrales solaires.

3-5) Métaux liquides :

L'intérêt des métaux liquides comme fluides caloporteurs est lié à leur bonnes caractéristiques de transfert thermique et aux hautes températures permises par ces fluides.

Les métaux liquides actuellement utilisés comme fluides caloporteurs sont :

le mercure (Hg), le sodium (Na), les alliages sodium-potassium (Na-K), le lithium (Li), le plomb (Pb) et les alliages plomb-bismuth (Pb-Bi). Leurs températures de fusion et d'ébullition sont indiquées au tableau suivant :

Tableau n°13 :

Métal	Hg	Na-K	Na	Pb-Bi	Li	Pb
Composition	-	Mélange de 78% de K et 22% de Na	-	Mélange de 44% de Pb et 55,5% Bi	-	-
Température de fusion (°C)	-38,9	-12,3	97,8	125	180	327
Température d'ébullition (°C)	357	784	883	1670	1317	1737

3-5-1) Propriétés physico-chimiques :

Leur domaine d'application est compris entre 200 et 700 °C et leur stabilité thermique est parfaite puisque ce sont des corps simple.

La faible capacité thermique massique de l'ordre de 1000 j/kg.k malgré des masses volumiques élevées génère un pouvoir caloporteur moyen inférieur de 20 à 50 % de celle de l'eau.

Grâce à une très bonne conductivité thermique (de l'ordre de 10 à 100 w/m.k), les métaux liquides présente un pouvoir calovecteur exceptionnel. Toutefois, du fait de viscosité élevées, leur coefficient de performance énergétique « puissance thermique transférée / puissance de pompage) reste inférieure à celui de l'eau.

Les métaux liquides présentent tous des risques d'incendie, le lithium, le sodium, l'alliage sodium-potassium s'enflamment spontanément à l'air et présentent donc des risques d'incendie.

Les propriétés thermiques de quelques métaux caloporteurs sont résumées dans le tableau ci-dessous :

Tableau n°14:

	Lithium (500°C)	Sodium (700°C)	Plomb (700°C)
Densité (Kg/M ³)	485	780	10140
Chaleur spécifique (j/kg.k)	4,2 10 ³	1,3 10 ³	1,5 10 ²
Conductivité thermique (W/m.k)	49,6	60	15
Viscosité (pa.s)	3,2 10 ⁻⁴	1,8 10 ⁻⁴	1,4 10 ⁻³

3-5-2) Principales applications des applications des métaux liquides comme fluides caloporteurs :

L'utilisation de métaux liquides dans l'industrie est très limitée et reste associée à de très hauts niveaux de température. L'application la plus connue concerne l'utilisation de sodium et du plomb dans les réacteurs nucléaires à neutrons rapides et, pour les métaux tels que le potassium et le lithium, dans des caloducs pour les applications aéronautiques.

III.4- Fluides caloporteurs dans l'industrie pétrolière en Algérie:

A son tour, l'industrie pétrolière et Gazière en Algérie, au cours de dernière décennie a connu le système de chauffage indirect par l'utilisation des fluides caloporteurs, les processus de production actuels requièrent en effet un maximum de fiabilité et une utilisation optimale des installations, et ce le cas de complexe de traitement et de recyclage du gaz « Hamra » dont un système d'huile chaude est utilisé comme moyen de chauffage, ce système fournit de la chaleur à l'unité de traitement par une huile dite huile diathermique, ou de même pour la raffinerie d'ARZEW, TFT et EL-RAR (complexe de traitement et de recyclage de gaz naturel) on utilise comme agent de chauffage une huile minérale pure dite « TORADA TC », on utilise aussi le gasoil comme fluide caloporteur au niveau de l'unité de fractionnement de condensat "UFC" Hassi messaoud.

4-1) Gasoil :

Le gasoil est un produit principal de la distillation atmosphérique de pétrole brut, il est destiné comme carburant pour les moteurs diesel, peut être utilisé comme fluide caloporteur pour le chauffage indirect dans les procédés de traitement du gaz et de pétrole.

➤ **Propriétés thermiques de gasoil aux conditions d'utilisation** (unité de fractionnement de condensat "UFC" avec une capacité de traitement 2500 m³/jour de condensat) :

- Débit : 970 m³/h.
- Densité : 0,68
- Température entrée four : 226 °C.
- Température sortie four : 270 °C.
- Viscosité dynamique : 0,32. 10⁻³ Pa s.
- Conductivité thermique : 0,102 Kcal / hm°C.
- Chaleur spécifique : 0,74 Kcal /kg°C.
- Point d'éclair : 120°C.
- Point d'écoulement : -12 °C

4-2) Huile diathermique :

L'huile diathermique connue par le non commercial « Therminol 66 » fournie par la société Belge « MONSATO Europe SA », exploitée par la société Sonatrach, est un liquide huileux caloporteur synthétique sur base d'un mélange de terphényles hydrogénés, utilisée pour les plages de températures extrêmes (de 0 jusqu'à 345°C). Elle est spécialement formulée pour offrir une longue durée de service et une excellente efficacité thermique.

➤ **Les propriétés physico-chimiques de huile diathermique :**

(Déjà étudié dans le chapitre II).

4-3) L'huile TORADA TC 32 :

L'huile TORADA TC 32 est une huile caloporteuse de la société Algérienne de raffinage du pétrole « NAFTEC », commercialisée par la société nationale de commercialisation et de distribution des produits pétroliers «NAFTAL», c'est une huile minérale pure thermiquement stable, conçue pour les systèmes de transfert de chaleur en phase liquide, fonctionnant à des températures pouvant atteindre 350 °C . Elle est spécialement formulée pour offrir une longue durée de service et une excellente efficacité thermique dans une variété d'applications industrielles tout en résistant à la dégradation causée par l'air et les températures.

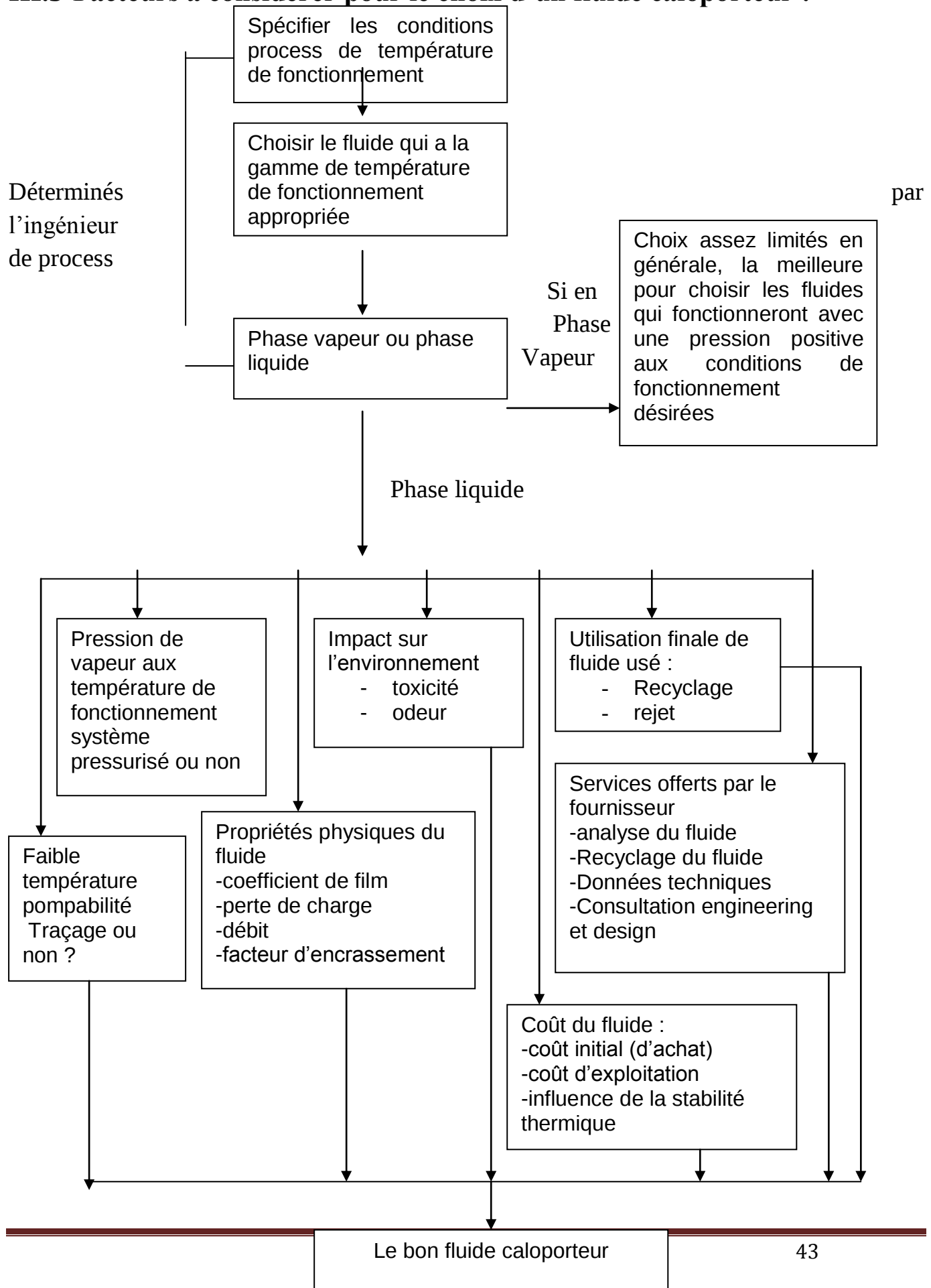
➤ **Propriétés physico-chimiques de la TORADA TC 32 :**

Le tableau suivant donne les résultats d'analyse de l'huile TORADA TC 32 neuve effectuées au niveau du laboratoire LUBIANA –France le 05 /01/2003.

Tableau n°15 : Propriétés physico–chimiques de la TORADA TC32.

Densité à 15°C	0,863
à 20°C	0,865
Viscosité cinématique (cst) à 40°C	35,2
à 100°C	5,25
Indice de viscosité	96
Point d'éclaire vase clos (°C)	223
Point d'éclaire vase ouvert (°C)	200
Indice d'acidité (mg KOH/g)	0,02
Solubilité dans l'eau	insoluble
Capacité calorifique (kcal /kg°C) à 20°C	0,451
à 320°C	0,712
Température d'auto inflammation (°C)	270
Point de feu (°C)	220

Point d'écoulement (°C)	-12
Pression de vapeur à 150°C	< 0,1 mmHg
à 200°C	< 7 mmHg
à 250°C	< 45 mmHg

III.5-Facteurs à considérer pour le choix d'un fluide caloporteur :



Chapitre IV : Problématique du sujet

Chapitre IV : Problématique du sujet

IV.1-le Problème du sujet :

L'huile caloporteuse utilisée depuis l'origine, par les unités de traitement de gaz de Hamra est le Therminol 66.

Chaque train dispose d'une boucle fermée de circulation d'huile chaude.

On utilise l'huile chaude dans le procédé au fond des colonnes, les réchauffeurs de gaz de régénération, réchauffeur de GPL à réinjecter dans le gisement et le réchauffeur de fuel gaz.

La quantité d'huile en circulation dans chaque boucle est 80 m^3 .

Suite à une erreur au niveau de service de commande, Sonatrach a effectué une commande d'achat d'une quantité de 182 tonnes de Therminol SP au lieu de commander la même quantité du Therminol 66 avec un prix total de 586586 euro

(6 milliards de centime).

Notre objectif est d'effectuer une étude approfondie sur le produit Therminol SP, suivi par une étude comparative entre les deux produits en question (Therminol 66 et Therminol SP).

Afin de sortir une conclusion concernant le fluide Therminol SP, en d'autre terme le produit est adapté aux normes d'utilisation au niveau de l'unité Hamra ou non

Le travail sera donné à la Sonatrach pour l'utiliser comme une base pratique pour prendre une décision finale d'utiliser Therminol SP à la place du Therminol 66 ou non ?

IV.2-Propriétés et caractéristiques du Therminol SP : [2]

Le Therminol SP est un fluide caloporteur synthétique utilisable en phase liquide, spécialement conçu pour le chauffage de procédés dans la plage 280-305°C. Doté d'une stabilité thermique très supérieure à celle des huiles minérales, du fait de sa grande pureté et de sa faible teneur en eau, il n'est pas corrosif pour les équipements et permet un démarrage aisé des installations.

Aux basses températures, avec une viscosité d'environ $300 \text{ mm}^2/\text{s}$ à -10°C , ce fluide est plus aisément pompable que la majorité des huiles minérales.

La composition du Therminol SP a été soigneusement sélectionnée pour minimiser la formation des fractions légères et éliminer les risques de dépôts insolubles et d'encastrement, à la seule condition que soient respectées les recommandations d'emploi, c'est-à-dire les températures maximales de veine et de film, et que l'installation soit correctement conçue et fonctionne dans les conditions normales prévues.

2-1) Propriétés physico-chimique du Therminol SP: (Tableau n°16).

Composition	Mélange d'hydrocarbure synthétique
Aspect	Liquide jaune pâle
La viscosité cinématique à 40 °C à 100 °C	19 cst 3,52 cst
La masse volumique à 15°C	875 kg/m ³
Température max dans la veine du fluide	315°C
Température max au contact de la paroi chaude	335°C
Point d'éclaire	166 °C
Point de feu	218 °C
Température auto inflammation	366°C
Point d'écoulement	-40°C
Point d'ébullition (à 1atm)	351°C
Coefficient de dilatation	0,00096 /°C
Teneur en eau	<150 ppm
Acidité total	< 0,2 mg KOH /g
Teneur en chlore	< 10 ppm
Corrosion en cuivre	<< 1a
Masse moléculaire moyenne	320

2-2) Evolution des propriétés thermiques du Therminol SP en fonction de la température : (Tableau n°17).

T° (°C)	Masse volumique (Kg/m ³)	Conductivité Thermique (W/m.K)	Chaleur massique (kj/kg.K)	viscosité		Pression de vapeur (absolue)) kPa
				Dynamique (mPa.s)	Cinématique (mm ² /s)	
-10	892	0,132	1,798	308,6	346	-
0	885	0,131	1,834	143,3	162	-
10	878	0,13	1,87	73,8	84	-
20	872	0,128	1,906	41,6	47,7	-
30	865	0,127	1,942	25,2	29,1	-
40	858	0,126	1,978	16,3	18,99	-
50	852	0,125	2,013	11,1	13,05	-
60	845	0,124	2,049	7,9	9,39	-

70	838	0,123	2,085	5,9	7,02	-
80	831	0,122	2,12	4,5	5,43	-
90	825	0,12	2,156	3,56	4,32	-
100	818	0,119	2,191	2,88	3,52	-
110	811	0,118	2,227	2,38	2,93	-
120	804	0,117	2,262	2	2,49	-
130	797	0,116	2,297	1,71	2,14	0,1
140	790	0,115	2,333	1,48	1,87	0,2
150	783	0,113	2,368	1,29	1,65	0,3
160	777	0,112	2,403	1,14	1,47	0,5
170	770	0,111	2,438	1,02	1,32	0,7
180	762	0,11	2,474	0,91	1,2	1,1
190	755	0,109	2,509	0,82	1,09	1,5
200	748	0,107	2,544	0,75	1	12,2
210	741	0,106	2,579	0,68	0,92	3
220	734	0,105	2,614	0,63	0,85	4,1
230	726	0,104	2,649	0,57	0,79	5,5
240	719	0,103	2,684	0,53	0,74	7,4
250	711	0,102	2,719	0,49	0,69	9,8
260	704	0,1	2,755	0,45	0,64	12,8
270	696	0,099	2,79	0,42	0,6	16,6
280	688	0,098	2,825	0,39	0,56	21,3
290	680	0,097	2,86	0,36	0,53	27,2
300	672	0,096	2,896	0,33	0,5	34,4
310	663	0,094	2,932	0,31	0,47	43,1
320	655	0,093	2,967	0,29	0,44	53,7
330	646	0,092	3,003	0,27	0,42	66,3
335	642	0,091	3,022	0,26	0,4	73,6

Equations :

-Masse volumique (kg / m^3) = $885,597 - 0,689367 * T (^{\circ}\text{C}) + 1,9228 * 10^{-4} T^2 (^{\circ}\text{C}) - 8,87642 * 10^{-7} * T^3 (^{\circ}\text{C})$.

-Chaleur massique ($\text{kJ} / \text{kg.K}$) = $1,83369 + 0,0036172 * T (^{\circ}\text{C}) - 4,94238 * 10^{-7} * T^2 (^{\circ}\text{C}) + 7,98115 * 10^{-10} * T^3 (^{\circ}\text{C})$.

-Conductivité thermique ($\text{W} / \text{m.K}$) = $0,131281 - 0,000114034 * T (^{\circ}\text{C}) - 1,49876 * 10^{-8} * T^2 (^{\circ}\text{C}) + 1,76622 * 10^{-11} * T^3 (^{\circ}\text{C})$.

-Viscosité cinématique (mm^2 / s) = $e^{\left(\frac{79889}{T(^{\circ}\text{C}) + 97,7} - 2,65773 \right)}$

-Pression de vapeur (KPa)= $e^{\left(\frac{-5322370}{(T(^{\circ}C)+480)+(T(^{\circ}C)+480)^2}+12,2641\right)}$

Les figures 10, 11, 12, 13 et 14 donnent l'évolution de ces propriétés de transfert thermiques en fonction de la température.

Figure n°10 :

Variation de la masse volumique du Therminol SP en fonction de la température :

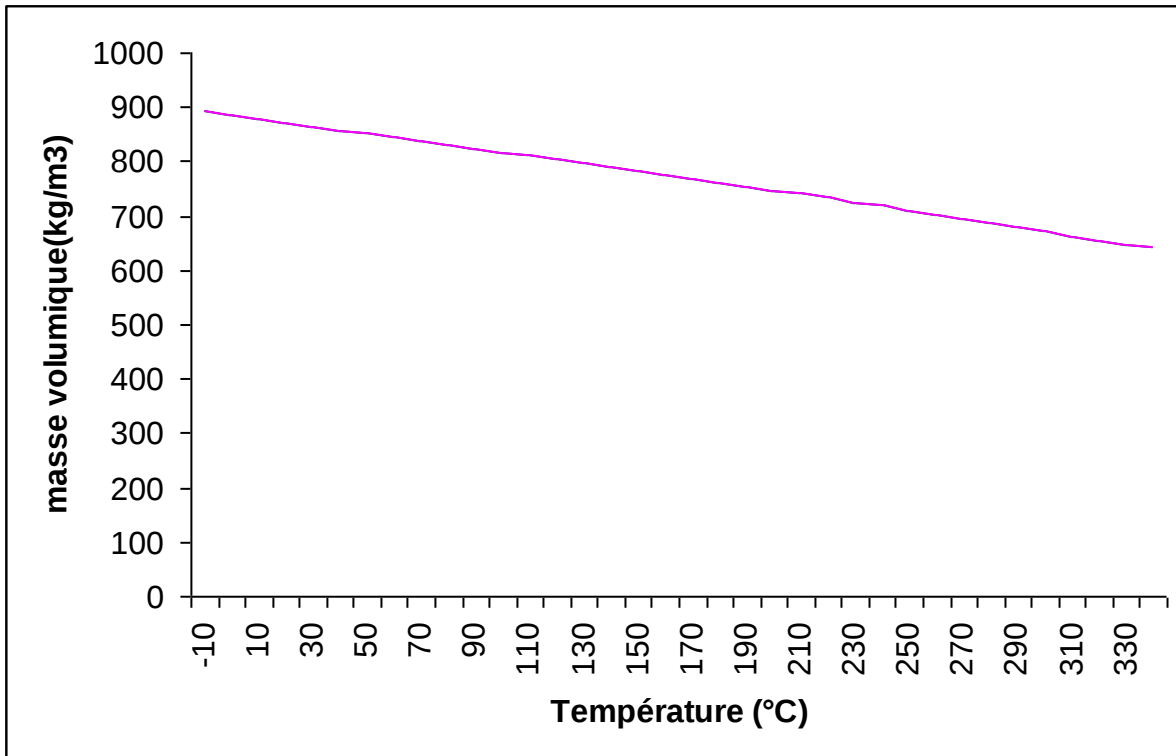
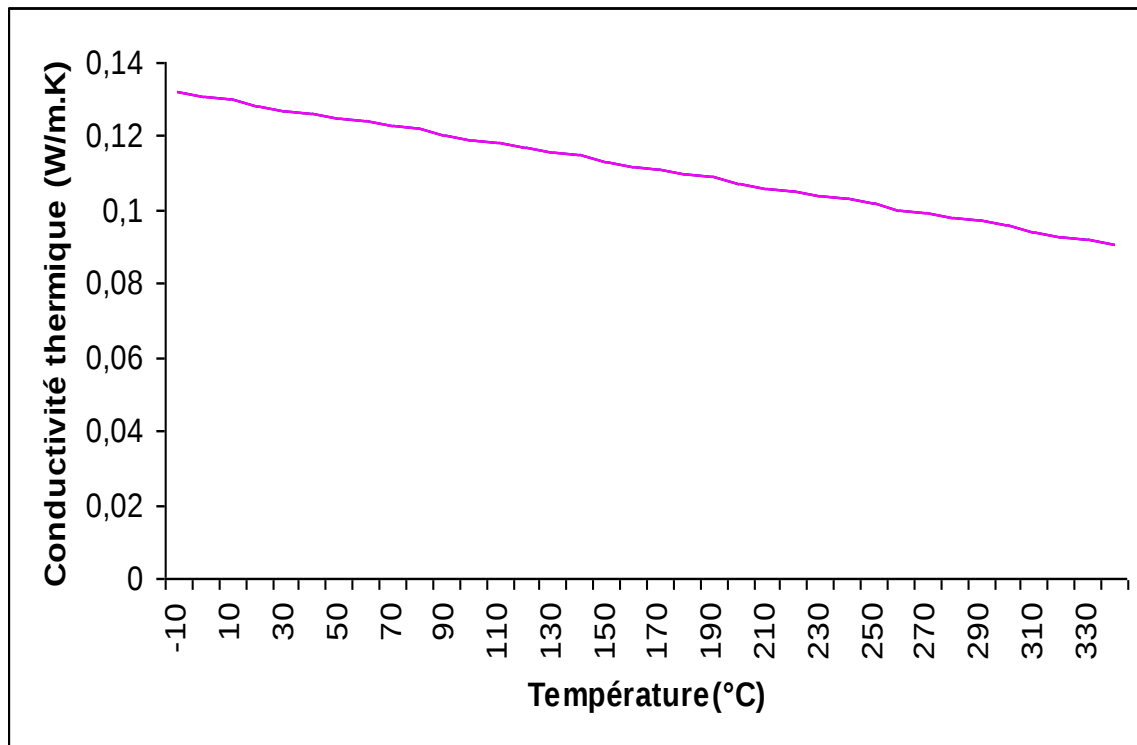


Figure n° 11

Variation de la conductivité thermique du Therminol SP en fonction de la température :

**Figure n°12 :**

Variation de la chaleur massique du Therminol SP en fonction de la température :

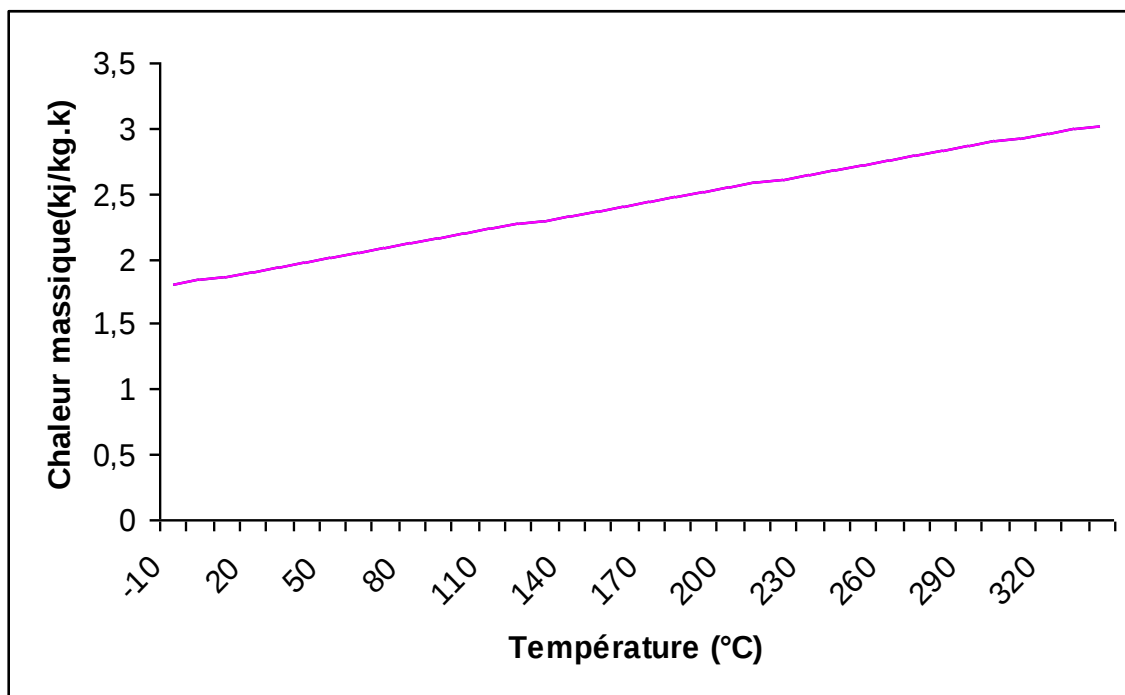
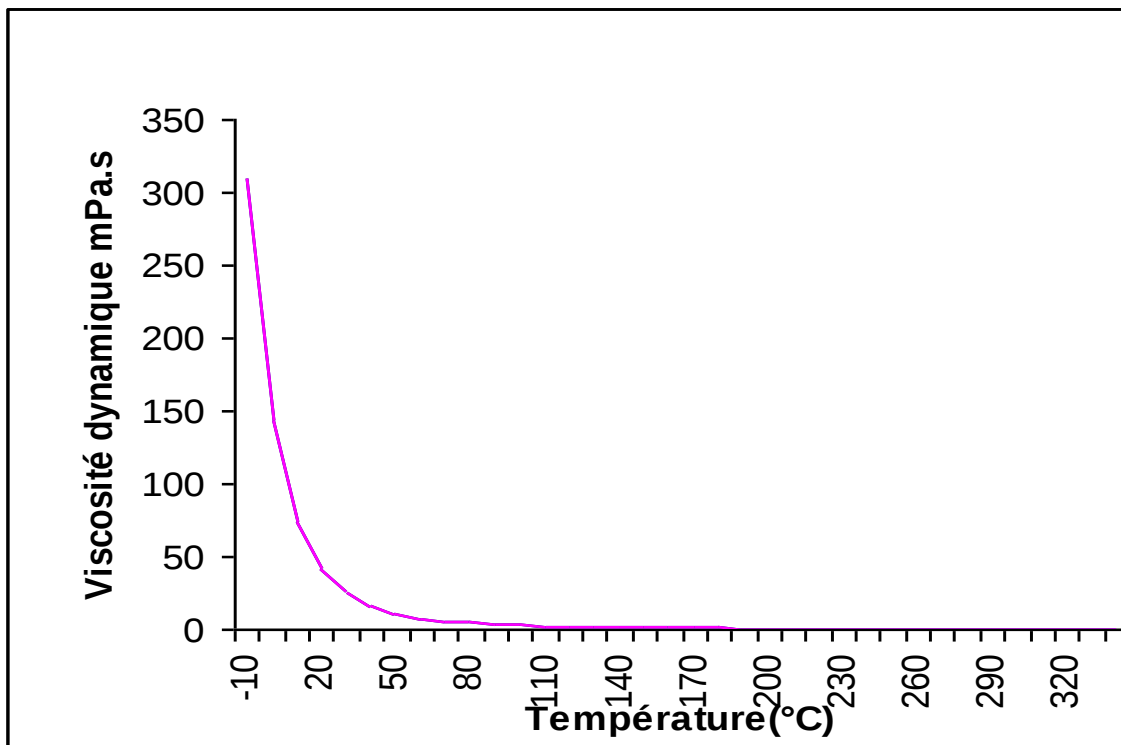
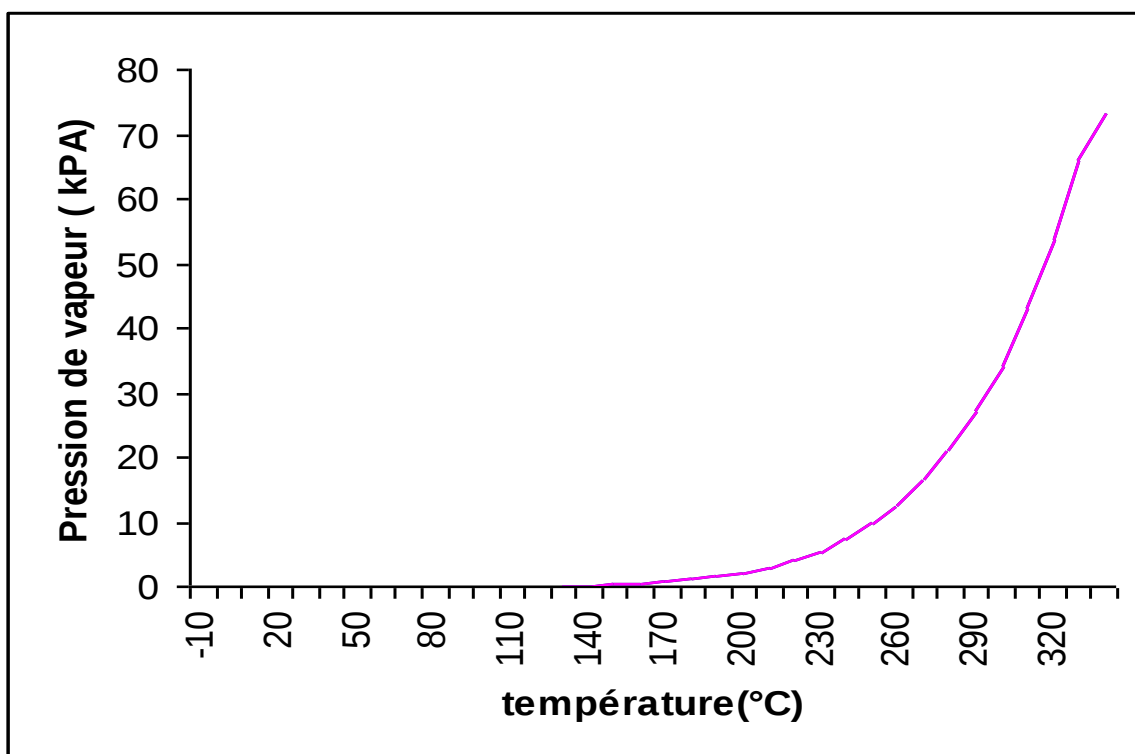


Figure n°13 :

Variation de la viscosité dynamique du Therminol SP en fonction de la température :

**Figure n°14:**

Variation de la pression de vapeur du Therminol SP en fonction de la température :



2-3) Application du Therminol SP:[3]

Le Therminol SP est utilisée dans les systèmes caloporteurs des applications suivantes :

- Chauffage du calandre.
- Chauffage de cargo de navires.
- Extruders.
- Chauffage de pipelines.
- Récupération de calorie de fumées.
- Systèmes solaires.

**Chapitre V :
comparaison des
caractéristiques
et des propriétés
Thermiques du
Therminol 66 et
Therminol SP**

Chapitre V : comparaison des caractéristiques et des propriétés Thermiques du Therminol 66 et Therminol SP

V.1-Comparaison des caractéristiques des deux huiles :

Le tableau suivant résume les principales caractéristiques des deux huiles : [2]

Tableau n°18 :

caractéristiques	Therminol 66	Therminol SP
Composition	Terphényle hydrogène	Mélange hydrocarbures synthétiques
Aspect	Liquide jaune pâle limpide	Liquide jaune pâle
Point d'éclair (°C)	170	166
Point de feu (°C)	216	218
Point d'écoulement (°C)	-32	-40
Température d'ébullition	359	351
Solubilité dans l'eau	Insoluble	Insoluble
Température d'utilisation	0 à 345	-10 à 315
Indice d'acidité mg KOH /g	<0,02	<0,2
Température d'auto-inflammation.	399	366
Stabilité thermique	Très bonne	Très bonne
Capacité thermique à 20°C(kj /kg°C)	1,562	1,906
Conductivité thermique à 20°C (W /m.K)	0,118	0,128
Viscosité à 20°C (mPa.s)	123,47	41,6
Résistance à l'oxydation	Grand	Grand
Tension de vapeur à 200°C (kPa)	3,02	2,2
Durée de vie	Elevée	Elevée
Résistance à corrosion	fort	fort
Coefficient de dilatation	0 ,0009 /°C	0,00096 /°C
Masse moléculaire	252	320
Teneur en eau	<150 ppm	<150 ppm

Chapitre V : comparaison des caractéristiques et des propriétés Thermiques du Therminol 66 et Therminol SP

Teneur en chlore	<10 ppm	<10 ppm
Domaine d'utilisation	-fluide caloporteur -fabrication des résines -distillation anhydride phtalique -production de polyester et de phénol	-fluide caloporteur -les systèmes de chauffage des cylindres de calendres -extruders -chauffage de pipelines

Les courbes suivantes montrent la variation des propriétés thermiques du Therminol 66 et Therminol SP en fonction de la température (voir annexe n°2)

Figure n°15.

Variation de la masse volumique du Therminol 66 et Therminol SP en fonction de la température :

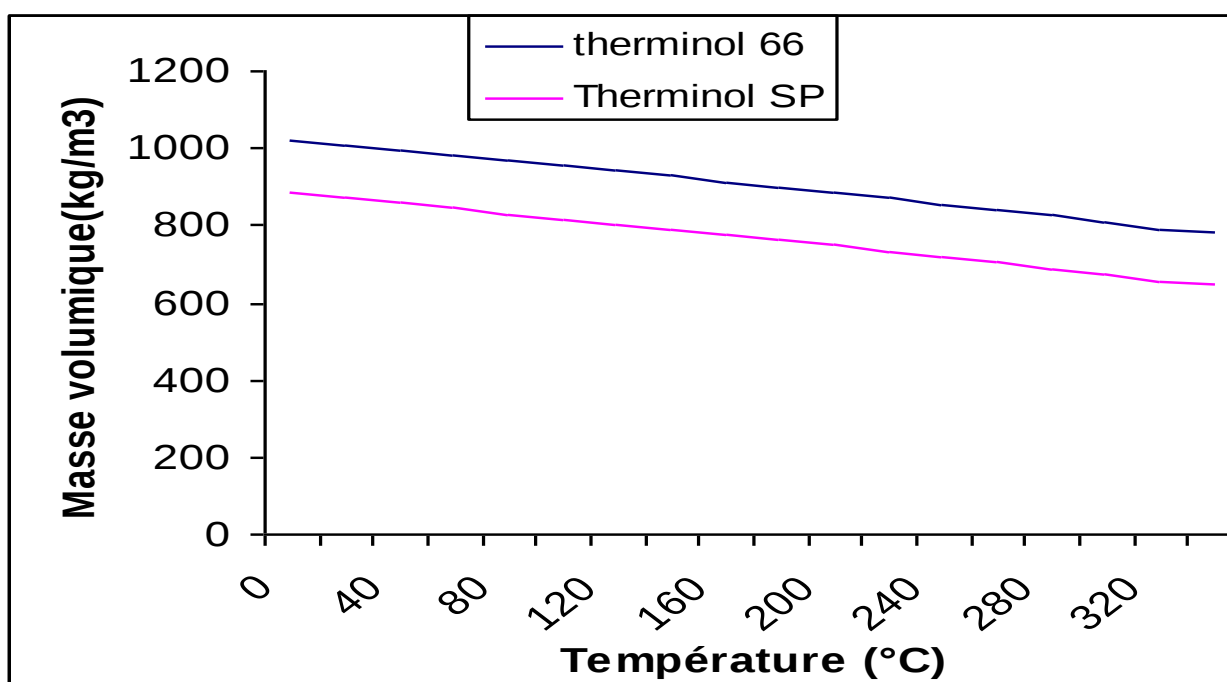


Figure n°16.

Variation de la conductivité thermique du Therminol 66 et Therminol SP en fonction de la température :

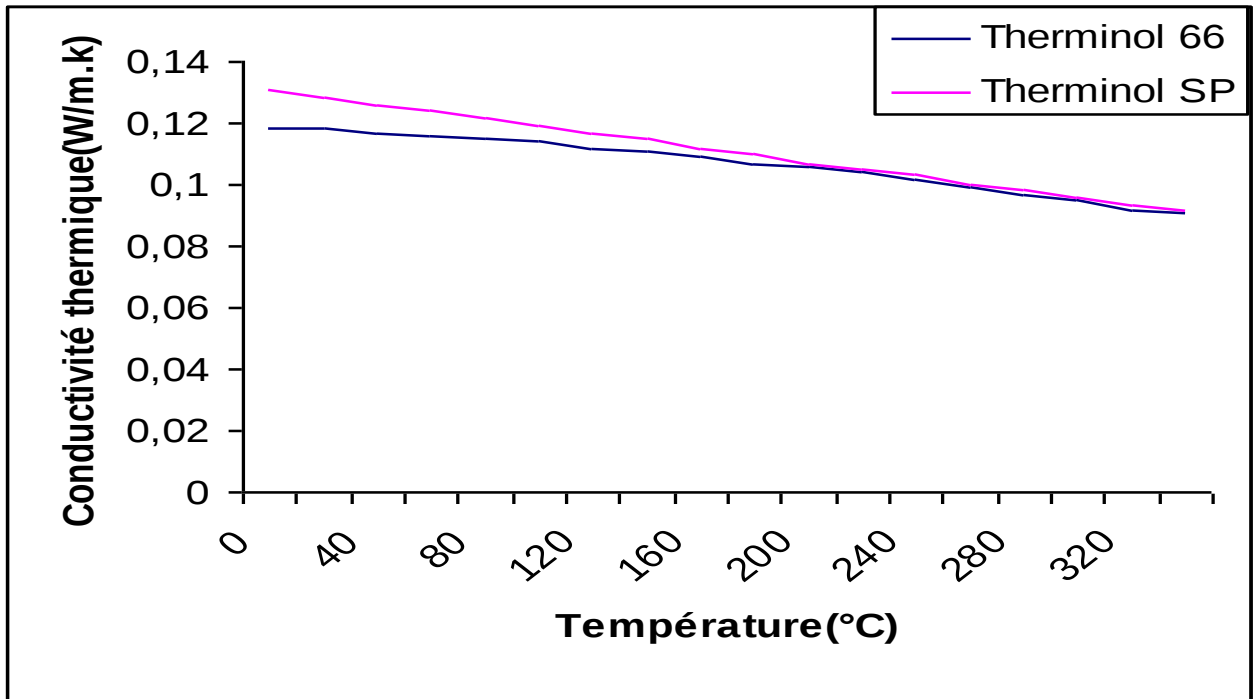


Figure n°17.

Variation de la chaleur massique du Therminol 66 et Therminol SP en fonction de la température :

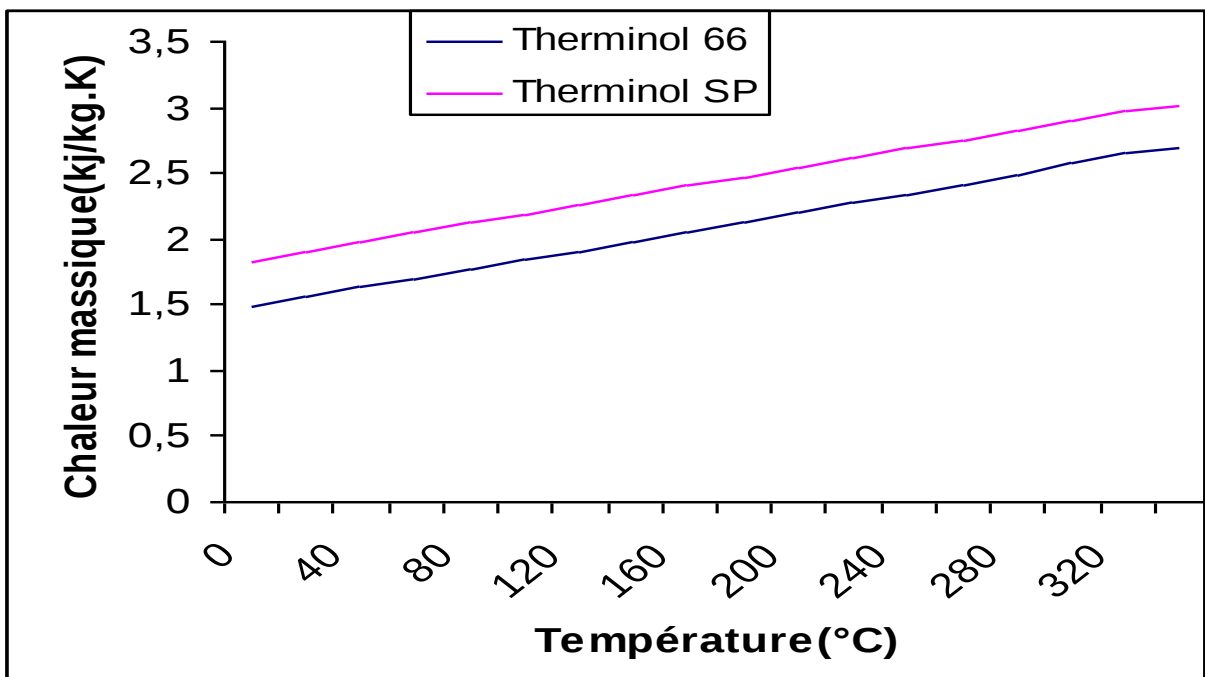


Figure n°18.

Variation de la viscosité dynamique du Therminol 66 et Therminol SP en fonction de la température :

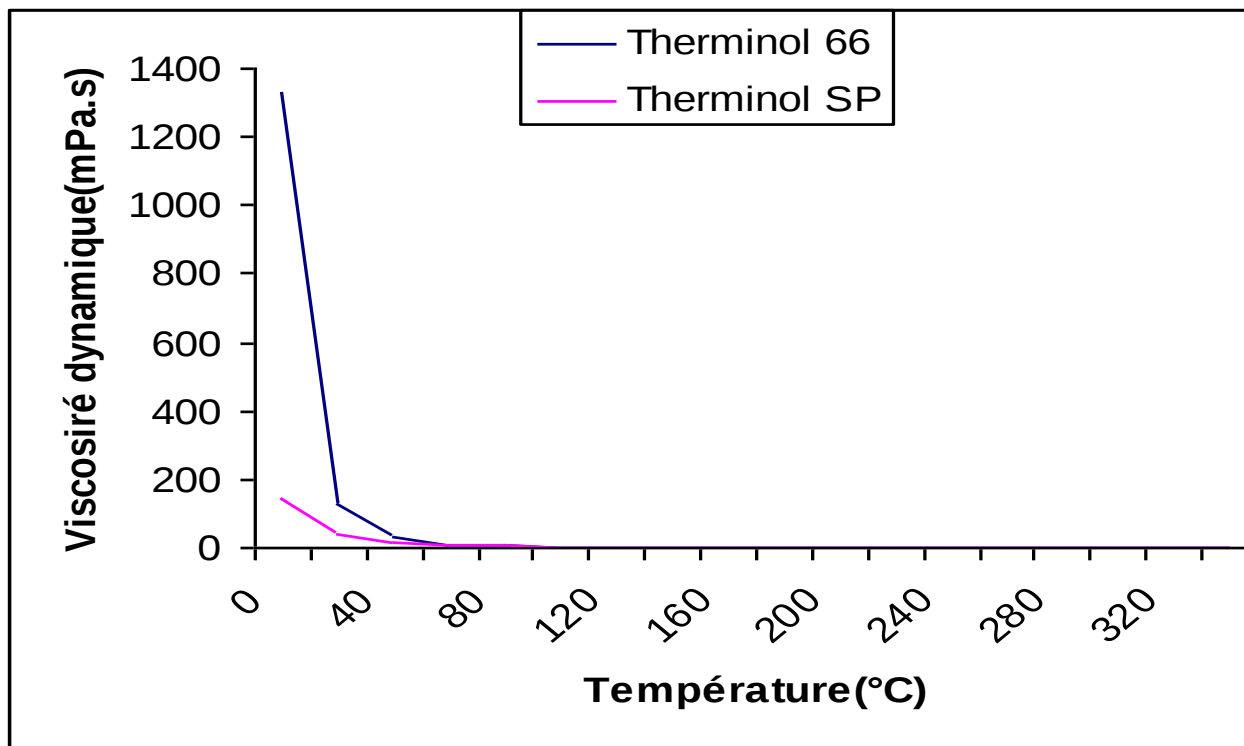
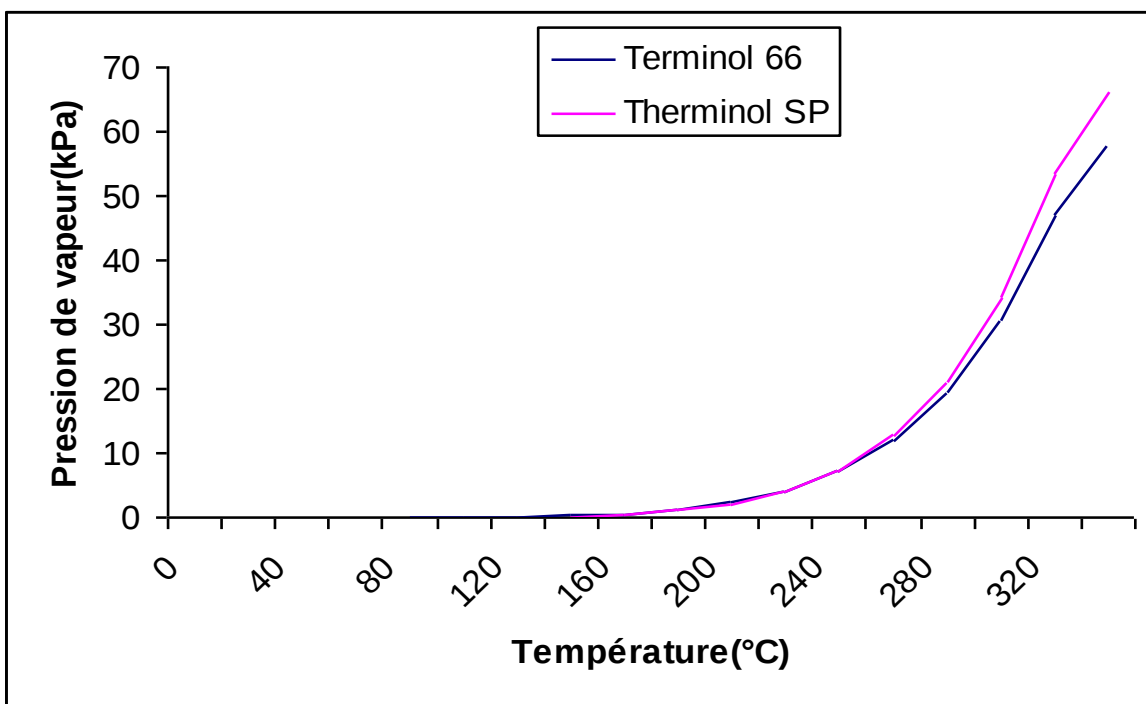
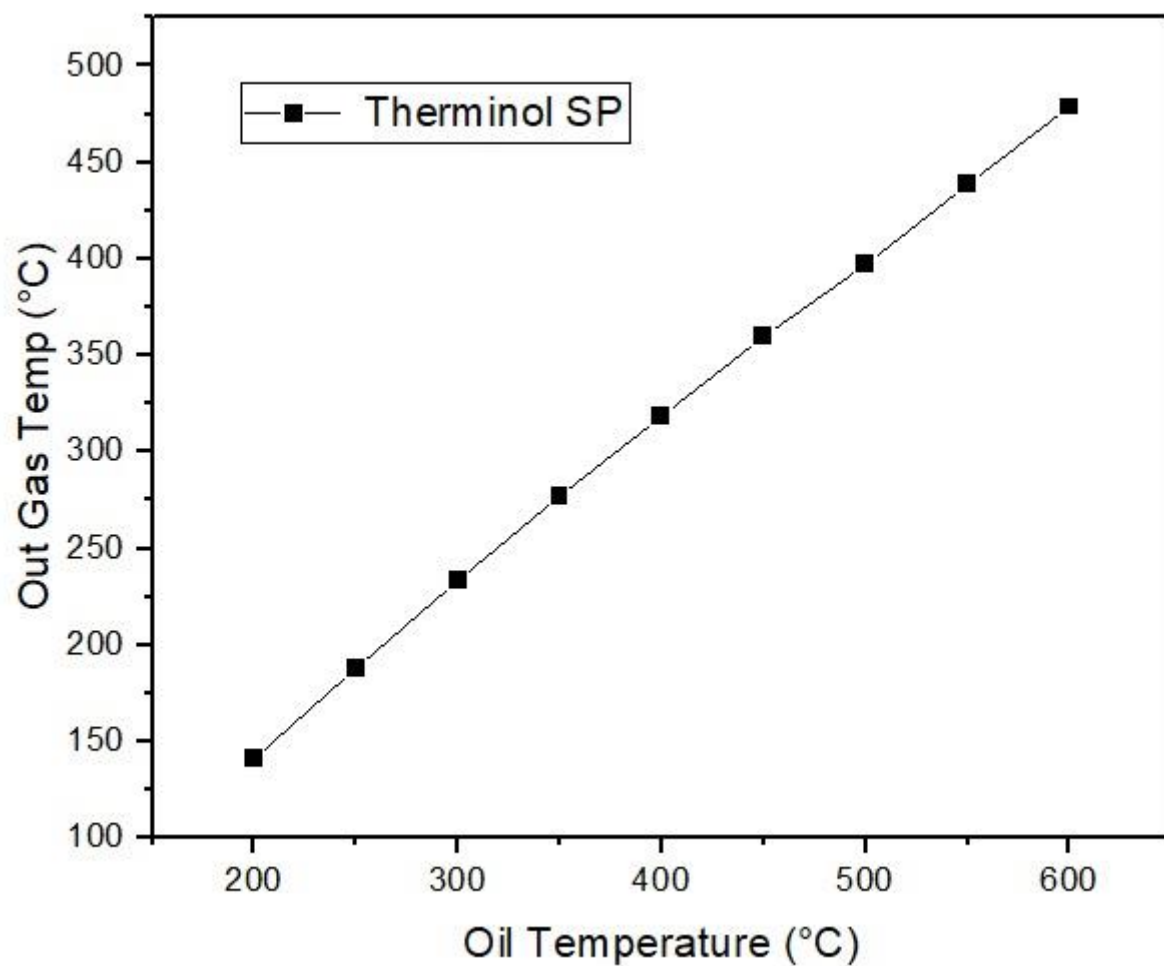
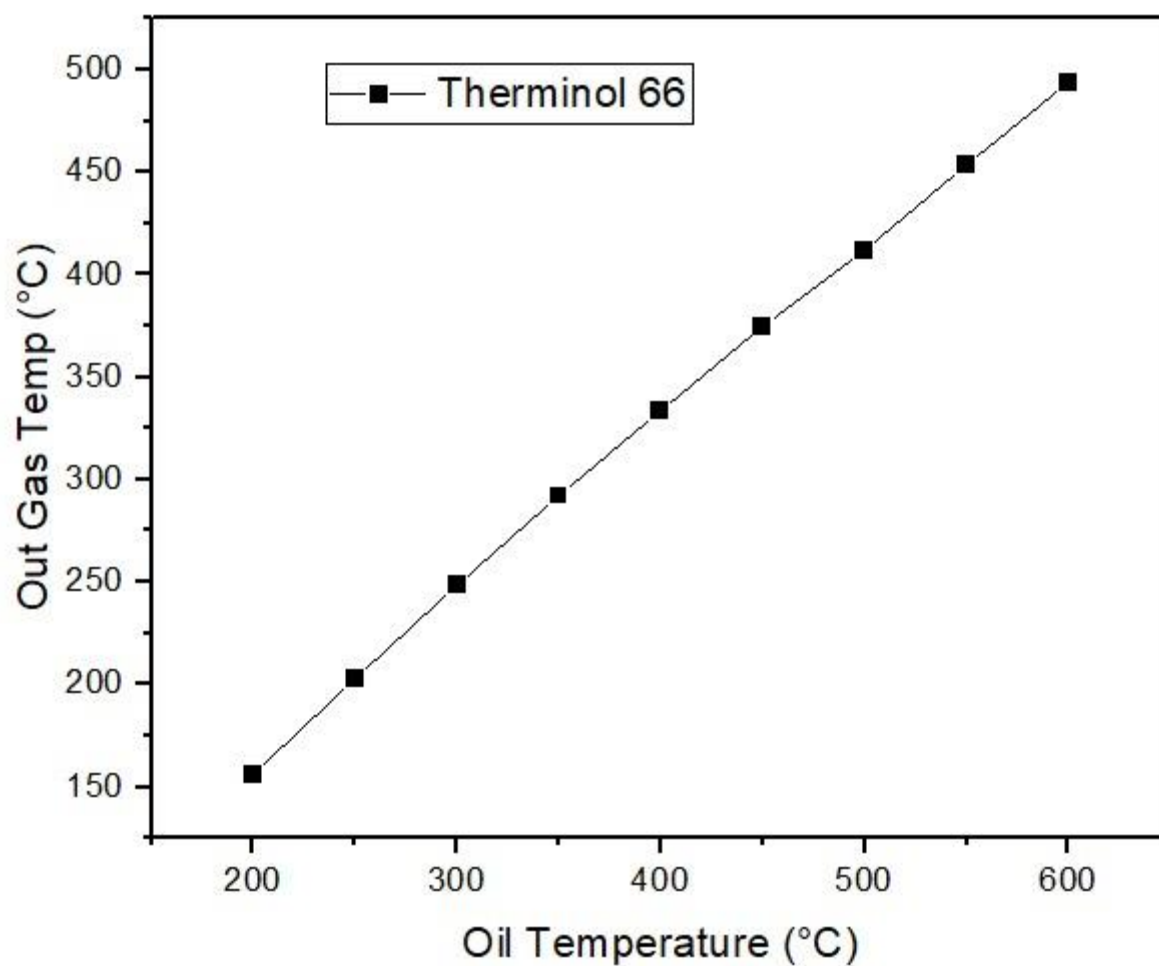


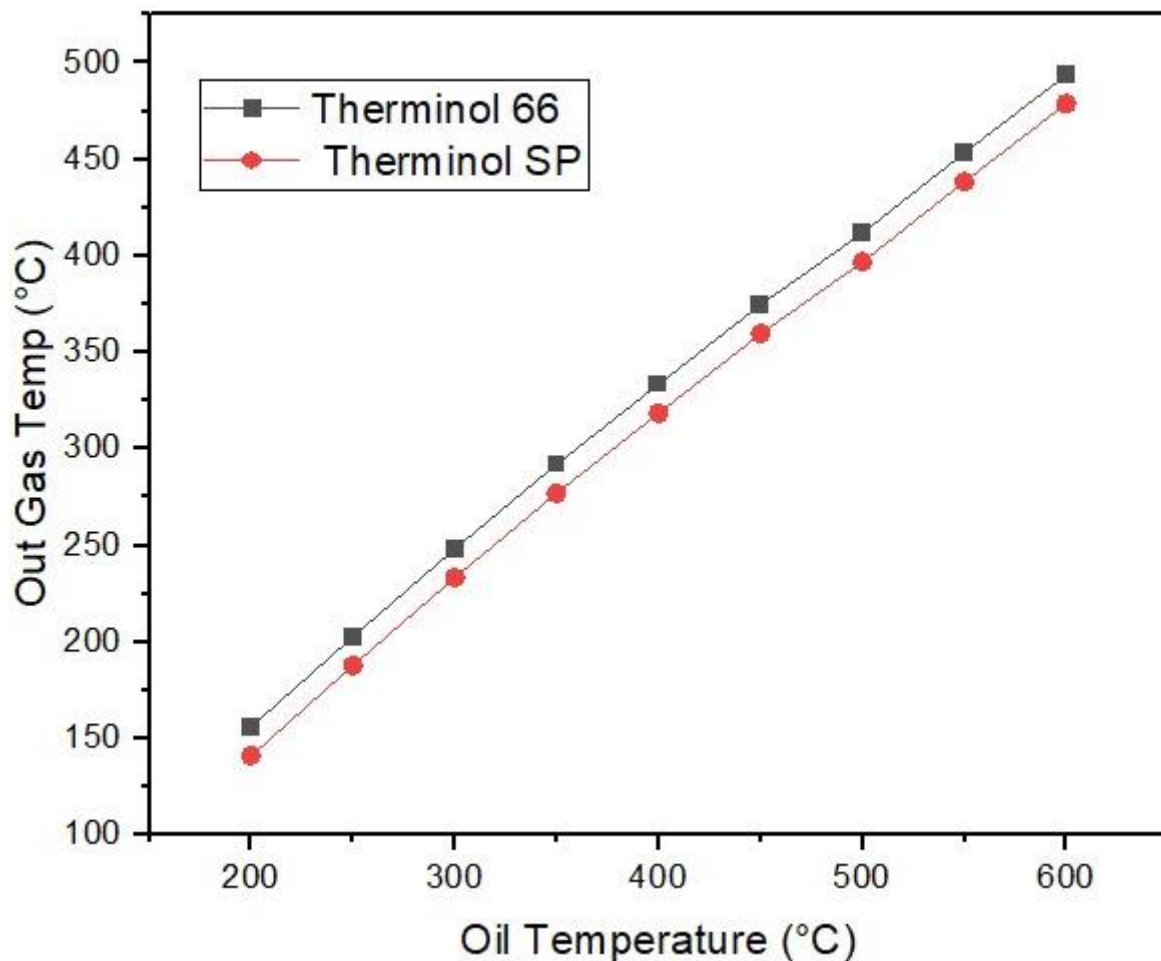
Figure n°19.

Variation de pression de vapeur du Therminol 66 et Therminol SP en fonction de la température :









V.2- Interprétation des courbes :

Les figures 15, 16, 17, 18 et 19 montrent clairement que le Therminol SP a un excellent transfert de chaleur, les données fournies sur la chaleur massique et la conductivité thermique démontrent la capacité du Therminol SP à absorber et à conduire la chaleur comme doit le faire un véritable fluide caloporteur. Ce avantage est traduit par un nombre de Prandtl plus élevé.

Un bon fluide caloporteur doit répondre à un certain nombre des conditions d'ordre techniques ou économiques :

- Faible agressivité vis-à-vis des matériaux (limite les risques de corrosion des équipements et d'encrassement des surfaces d'échange).
- Ne pas se décomposer sous l'effet de la chaleur à la température de fonctionnement.
- Avoir une capacité thermique et une conductivité thermique aussi élevée que possible.
- Avoir une faible tension de vapeur (TV).

Chapitre V : comparaison des caractéristiques et des propriétés Thermiques du Therminol 66 et Therminol SP

- Avoir une très faible viscosité aux températures de fonctionnement.

Toutes ces propriétés sont assurées par le Therminol SP qui peut être utilisée dans les mêmes conditions de service pour le système existant à Hmara, alors de point de vue technique on peut remplacer therminol66 actuellement utilisée par l'huile Therminol SP.

Chapitre VI :
Calcul Thermique des
équipements du circuit
d'huile chaude

Chapitre VI : Calcul Thermique des équipements du circuit d'huile chaude

I-Calcul thermique du four''141/F-01'' :

Le four 141/F-01 est de type cylindrique vertical comprend une zone de radiation et une zone de convection. Il est équipé de huit (08) brûleurs à l'air induit; ayant le rôle d'apporter de la chaleur à l'huile diathermique dans le système huile chaude afin d'assurer le fonctionnement correct des unités de traitement 10 et 20 et l'unité de distribution de fuel gaz.

Le 141 / F-01 fonctionne dans les conditions de service suivantes :

- Rendement global du four : $\eta_T = 80\%$.
- Excès d'air : 20%.
- Flux moyen : $\phi_{\text{moy}} = 32000 \text{ Kcal/h m}^2$.

La figure n°20 représente les conditions de fonctionnement du four.

Le tableau n°19 donne les caractéristiques de la zone de convection et de la zone de radiation du four de préchauffe du Therminol 66.

Tableau n°19 :

caractéristiques	Zone de radiation	Zone de convection
Nombre de passes	4	4
Nombre des tubes	80	40
Perte de charge	3,5	3,5
Température des tubes	500	350
Diamètre intérieur D_i des tubes (mm)	129,838	155 ,858
Longueur des tubes L (mm)	16400	5790

❖ Situation actuelle (Therminol 66 comme huile caloporteuse) :

Données process du Therminol 66 dans les conditions de fonctionnement :

- Débit massique de la charge d'huile diathermique: $M = 534 \cdot 10^3 \text{ kg/h}$.
- Température entrée : $T_e = 215 \text{ }^\circ\text{C}$.
- Température sortie: $T_s = 302 \text{ }^\circ\text{C}$.

Propriétés thermiques du Therminol 66 à la température moyenne de service $T_{\text{moy}}=259^\circ\text{C}$:

- Densité d'huile diathermique (l a charge à 15 °C) : 1,011.
- Chaleur spécifique moyenne de l'huile : $C_p = 2,413 \text{ kJ/kg.K} = 0,577 \text{ kcal/kg.K}$
- Masse volumique moyenne : $\rho = 841 \text{ kg/m}^3$.
- Viscosité moyenne : $\mu = 0,534 \cdot 10^{-3} \text{ Pa.s}$.
- Conductivité moyenne : $\lambda = 0,099 \text{ W/m.K} = 0,085 \text{ kcal/h.m.K}$.

1- Bilan thermique du four 141/F-01: [5]

1-1) Détermination de la chaleur totale absorbée dans le four " Q_{abs} " :

La chaleur absorbée par Therminol 66 dans le four est :

$$Q_{abs} = M C_p (T_s - T_e) \dots \dots \dots (1).$$

D'où : $Q_{abs} = 534 \cdot 10^3 \cdot 0,577 (302 - 215) = 27,08 \cdot 10^6 \text{ Kcal/h}$

La chaleur absorbée dans le four est alors : $Q_{abs} = 26,80 \cdot 10^6 \text{ Kcal/h}$.

1-2) Détermination de la chaleur libérée (Q_{lib}) par le four :

La chaleur libérée par le four est déterminée d'après la formule suivante :

On le rendement du four $\eta_T = \frac{Q_{abs}}{Q_{lib}} \Rightarrow Q_{lib} = \frac{Q_{abs}}{\eta_T} = \frac{26,80 \cdot 10^6}{0,8}$ alors :

La quantité de chaleur libérée est de : $Q_{lib} = 33,5 \cdot 10^6 \text{ kcal/h}$.

1-3) Détermination de la chaleur absorbée (Q_{rad}) dans la zone de radiation:

La chaleur absorbée dans la zone de radiation est calculée en fonction du flux de chaleur moyen développé dans la radiation (ϕ_{moy}) et la surface d'échange (S_{ech}) d'après la formule suivante :

$$\phi_{moy} = \frac{Q_{rad}}{S_{ech}}$$

Avec : $S_{ech} = \pi \cdot L_{eff} \cdot D_{ext} \cdot N_t$

L_{eff} : Longueur effective des tubes (exposée au flamme), $L_{eff} = 16,4 \text{ m}$.

D_{ext} : Diamètre extérieur des tubes, $D_{ext} = 14,13 \text{ cm}$

N_t : Nombre des tubes.

$$S_{ech} = 3,14 \cdot 14,13 \cdot 10^{-2} \cdot 16,4 \cdot 80 \Rightarrow S_{ech} = 582,11 \text{ m}^2.$$

Alors : $Q_{\text{rad}} = \phi_{\text{moy}} \cdot S_{\text{ech}} = 32000.582,11 \Rightarrow Q_{\text{rad}} = 18,62 \cdot 10^6 \text{ kcal/h.}$

Cette chaleur est de 69,47 % de la chaleur totale absorbée dans le four.

1-4) Détermination de la chaleur absorbée (Q_{con}) dans la zone de convection :

La chaleur totale absorbée dans le four est : $Q_{\text{abs}} = Q_{\text{rad}} + Q_{\text{con}}$ alors :

$$Q_{\text{con}} = Q_{\text{abs}} - Q_{\text{rad}} = 26,80 \cdot 10^6 - 18,62 \cdot 10^6$$

$$Q_{\text{con}} = 8,18 \cdot 10^6 \text{ kcal/h}$$

D'où la chaleur absorbée dans la convection est de 30,53 % de la chaleur total absorbée dans le four.

2- Calcul du coefficient de transfert (h_{ri}) et les pertes de charge ΔP_r côté tube dans la zone de radiation :

Le calcul est basé sur les caractéristiques de la charge (Therminol 66).

Les caractéristiques de transfert thermique et le régime d'écoulement à l'intérieur dans les tubes; donnés par les équations des nombres sans dimensions suivants:

- Le régime d'écoulement, déterminé par nombre de Reynolds (Re) : [5]

$$Re = \rho \frac{U \cdot D_i}{\mu} = \frac{G \cdot D_i}{\mu} \dots\dots\dots (2)$$

- Les caractéristiques de la charge, données par le nombre de Prandlt (Pr) :

$$Pr = \frac{Cp \cdot \mu}{\lambda} \dots\dots\dots (3)$$

- Les caractéristiques de transfert thermique, données par Nusselt (Nu) :

$$Nu = \frac{h \cdot D_i}{\lambda} \dots\dots\dots (4)$$

Avec :

- G : Vitesse massique de la charge (kg/sm^2).
- h : Coefficient du transfert thermique à l'intérieur des tubes.

Le calcul de Nu rend alors évident le calcul de coefficient h

Les caractéristiques thermiques de la charge (Therminol 66) sont données à la température moyenne de fonctionnement.

2-1) Calcul le régime d'écoulement "Re" :

- Détermination de la vitesse massique de la charge "G" à l'intérieur des tubes :

$$G = M / a$$

Avec :

$$a_t : \text{Section du passage des tubes (m}^2\text{)}: a_t = \frac{\pi \cdot D_i^2 \cdot N_t}{4 \cdot n_p} = \frac{\pi \cdot (129,838 \cdot 10^{-3})^2 \cdot 80}{4 \cdot 4} \dots\dots (05)$$

La section du passage donc est de : **$a_t = 0,264 \text{ m}^2$** .

D'où :

$$G = 534 \cdot 10^3 / 0,264 = 2,022 \cdot 10^6 \text{ kg / hm}^2 \Rightarrow G = \mathbf{561,86 \text{ kg / s.m}^2}.$$

- La vitesse linéaire d'écoulement de la charge dans les tubes est de :

$$U = G / \rho \Rightarrow U = \mathbf{0,668 \text{ m / s}}.$$

- Le régime d'écoulement est donc :

$$Re = (561,86 \cdot 129,838 \cdot 10^{-3}) / 0,534 \cdot 10^{-3} \Rightarrow \mathbf{Re = 1,36 \cdot 10^5 > 10^4}.$$

Le régime d'écoulement de l'huile chaude dans les serpentins de four est un régime turbulent.

L'équation générale en régime turbulent s'écrit :

$$Nu = \frac{h_{ri} \cdot D_i}{\lambda} = 0,023 \cdot Re^{0,8} \cdot Pr^{1/3} \cdot \phi_t \dots\dots\dots (06)$$

2-2) Calcul Pr :

$$\text{La formule (3) donne : } Pr = (0,577 \cdot 0,534 \cdot 10^{-3}) \cdot 3600 / 0,085 \Rightarrow \mathbf{Pr = 13,05}$$

2-3) Calcul ϕ_t :

$$\phi_t = \left(\frac{\mu}{\mu_t} \right)^{0,14} : \text{Le coefficient correctif de viscosité}$$

La température du peau des tubes est de 500 °C alors: $\mu_{500 \text{ °C}} = 0,183 \cdot 10^{-3} \text{ Pa.s}$

$$\text{Donc le coefficient } \phi_t = (0,534 / 0,183)^{0,14} \Rightarrow \mathbf{\phi_t = 1,16}.$$

L'application de l'équation (*) donne :

$$Nu = 0,023 \cdot (1,36 \cdot 10^5)^{0,8} \cdot (13,01)^{1/3} \cdot 1,16 \Rightarrow \mathbf{Nu = 803,31}$$

L'équation (06) donne :

$$h_{ri} = (0,085 \cdot 803,31) / 129,838 \cdot 10^{-3} \Rightarrow \mathbf{h_{ri} = 525,89 \text{ kcal / h m}^2 \text{ °C}}.$$

2-4) Calcul des pertes de charge (ΔP) à l'intérieur des tubes :

Les pertes de charge due au frottement de Therminol66 à l'intérieur des tubes sont :

$$\Delta P = \Delta P_L + \Delta P_S \dots\dots\dots (07)$$

Avec :

$$\Delta P_L = \frac{F \cdot G^2 \cdot L}{D_i \cdot d \cdot \phi_t} \cdot 10^{-5} \quad \text{perte de charge linéaire (bar)}$$

Tel que :

- F : Coefficient du frottement qui caractérise la nature et l'état de surface interne des tubes, $F = f$ (de régime d'écoulement le quel s'exprime par le nombre de Reynolds et l'état de surface des parois).

Pour les tubes de types acier ASTM A106GrB le coefficient du frottement donné par la formule : $F = 0,0035 + (0,264 / \text{Re}^{0,42})$, $\text{Re} = 1,36 \cdot 10^5 \Rightarrow F = 0,00534$.

- d : densité de la charge, $d = 0,841$

$$\Delta P_S = \frac{K \cdot U^2 \cdot a_t}{148,2} \quad : \text{Perte de charge singulière pour les coudes des tubes (bar)}$$

Pour le diamètre de 12,98 cm des tubes de radiation, le coefficient de perte de charge pour les coudes est de $k=19,7$.

La perte de charge total sera donc :

$$\Delta P = \frac{F \cdot G^2 \cdot L}{D_i \cdot d \cdot \phi_t} \cdot 10^{-5} + \frac{K \cdot U^2 \cdot a_t}{148,2} \quad (\text{bar}). \quad (*07)$$

L'application de la formule (07) donne :

$$\Delta P_r = \frac{0,00534 \cdot (561,86)^2 \cdot 16,4}{129,838 \cdot 10^{-3} \cdot 0,841 \cdot 1,16} \cdot 10^{-5} + \frac{19,7 \cdot (0,668)^2 \cdot 0,264}{148,2}$$

$$\Delta P_r = 2,19 \text{ bar}$$

3- Calcul du coefficient de transfert (h_{ci}) et les pertes de charge ΔP_c côté tube dans la zone de convection [5] :

Le calcul est basé sur l'équation (06) :

3-1) Détermination du régime d'écoulement :

$$Re = \rho \frac{U.D_i}{\mu} = \frac{G.D_i}{\mu}, \text{ Avec } D_i : \text{ le diamètre des tubes dans la zone de convection}$$

$$G = M / a_t$$

$$D_i = 155,858 \text{ mm.}$$

N_t : Nombre des tubes dans la zone de convection, $N_t = 40$ tubes.

n_p : nombre de passe dans la convection, $n_p = 4$ passes.

- L'application de la formule (05) donne : $a_t = 0,19 \text{ m}^2$.

Alors la vitesse massique de Therminol 66 dans les tubes de convection est de :

$$G = 534 \cdot 10^3 / 0,19 = 2,81 \cdot 10^6 \text{ kg / h m}^2 \Rightarrow \mathbf{G = 780,70 \text{ kg / s m}^2}.$$

- La vitesse d'écoulement de la charge (Therminol 66) dans la section de convection est :

$$U = G / \rho \Rightarrow \mathbf{U = 0,928 \text{ m / s.}}$$

- Le régime d'écoulement d'après la formule (02) est :

$$Re = (780,70 \cdot 155,858 \cdot 10^{-3}) / 0,564 \cdot 10^{-3} \Rightarrow \mathbf{Re = 2,27 \cdot 10^5 > 10^4}.$$

Le régime d'écoulement de l'huile chaude dans les tubes de la zone de convection est un régime turbulent, le coefficient de transfert interne (h_{ci}) est donné par la formule (06).

3-2) Calcul Pr :

L'application de l'équation (02) donne :

$$Pr = (0,577 \cdot 0,534 \cdot 10^{-3}) \cdot 3600 / 0,085 \Rightarrow \mathbf{Pr = 13,05}$$

3-3) Calcul ϕ_t :

$$\phi_t = \left(\frac{\mu}{\mu_t} \right)^{0,14} : \text{Coefficient correctif de viscosité dans la zone de convection.}$$

La température de la peau des tubes est de 350 °C.

$$\text{à } T = 350 \text{ °C, } \mu_{350^\circ\text{C}} = 0,32 \cdot 10^{-3} \text{ Pa.s}$$

Le coefficient correctif donc est : $\phi_t = 1,07$.

L'équation (06) donne:

$$Nu = 0,023.(2,27 \cdot 10^5)^{0,8} \cdot (13,05)^{1/3} \cdot 1,07 \Rightarrow Nu = 1116,35$$

L'équation (04) donne:

$$h_{ci} = (0,085.1116,35) / 155,858 \cdot 10^{-3} \Rightarrow h_{ci} = 608,82 \text{ kcal / h m}^2 \text{ }^\circ\text{C}.$$

3-4) Calcul des pertes de charge (ΔP) à l'intérieur des tubes dans la section de convection :

Les pertes de charge dues au frottement du Therminol 66 à l'intérieur des tubes dans la zone de convection sont données par la formule (N°07) :

Pour les tubes de types acier ASTM A106GrB le coefficient du frottement donné par la formule : $F = 0,0035 + (0,264 / Re^{0,42})$, $Re = 2,15 \cdot 10^5 \Rightarrow F = 0,005$

- $G = 780,70 \text{ kg / sm}^2$.

- $d = 0,841$.

Pour le diamètre de 15,58cm des tubes de convection, le coefficient de perte de charge pour les coudes est de $k=25$.

D'après la formule (*07) on a :

$$\Delta P_c = \frac{0,005.(780,70)^2 .5,79}{155,858.10^{-3} .0,841.1,07} .10^{-5} + \frac{25.(0,928)^2 .0,19}{148,2}$$

$$\Delta P_c = 1,28 \text{ bar}$$

La perte de charge totale dans le four sera donc : $\Delta P_T = \Delta P_r + \Delta P_c$

$$\Rightarrow \Delta P_T = 2,19 + 1,28$$

$$\Delta P_T = 3,47 \text{ bar}.$$

$$\Delta P_T = 3,47 \text{ bar} < 3,5 \text{ bar. Pertes de charge admissibles.}$$

❖ Cas d'utilisation du Therminol SP:

Le but est d'assurer l'échange thermique dans le four 141/F-01 nécessaire au fonctionnement normal des unités (température sortie four $T=302 \text{ }^\circ\text{C}$) avec les mêmes conditions de service que le cas actuel, alors il faut déterminer :

- Le débit d'huile Therminol SP qui permettra d'effectuer le transfert thermique (pour une quantité de chaleur absorbée de $26,80 \cdot 10^6 \text{ kcal / h}$, assurée par le four)
- Le coefficient de film à l'intérieur des tubes.

Données process du Therminol SP dans les conditions de fonctionnement :

- La quantités de chaleur nécessaire pour le fonctionnement
 $Q_{abs}=26,80 \cdot 10^6 \text{ kcal / h}$
- Température entrée : $T_e=215^\circ\text{C}$.
- Température sortie : $T_s=302^\circ\text{C}$.

Les propriétés thermiques du Therminol SP sont données à la température moyenne ($T_{moy} = 259^\circ\text{C}$) de fonctionnement :

- Densité d'huile (la charge à 15°C) : 0,875
- Chaleur spécifique moyenne de l'huile : $C_p = 0,658 \text{ kcal/kg}^\circ\text{C} = 2,751 \text{ kJ/kg}^\circ\text{C}$
- Masse volumique moyenne : $\rho = 705 \text{ kg / m}^3$.
- Viscosité moyenne : $\mu = 0,456 \cdot 10^{-3} \text{ kg / s m}$;
- Conductivité moyenne : $\lambda = 0,086 \text{ Kcal / h m}^\circ\text{C} = 0,1002 \text{ w/m k}$.

1 - Calcul du débit du Therminol SP nécessaires " m " :

La quantité de chaleur absorbée est : $Q_{abs} = 26,80 \cdot 10^6 \text{ kcal / h}$,

Le débit du Therminol SP correspond à cette quantité est :

$$Q_{abs} = m \cdot C_p \cdot \Delta T \Rightarrow m = Q_{abs} / C_p \cdot (T_s - T_e)$$

$$\text{Donc : } m = (26,80 \cdot 10^6) / 0,658 (302 - 215) \Rightarrow m = 468,15 \cdot 10^3 \text{ kg / h.}$$

Alors pour assurer une température sortie four de 302°C pour le fonctionnement des unités, il faut un débit massique de $468,15 \cdot 10^3 \text{ kg / h}$ ou bien, un débit volumique de $v = 664,04 \text{ m}^3 / \text{h}$.

2- Calcul du coefficient de transfert " h_{ri} " et les pertes de charge ΔP_r coté tubes dans la zone de radiation :

2-1) Détermination du régime d'écoulement "Re" :

L'application de la formule (01) donne : $Re = (G \cdot Di) / \mu$

- G : La vitesse d'écoulement de Therminol 66 dans les tubes de la zone de radiation :

$$G = m / a_t = 468,15 \cdot 10^3 / 0,264 \Rightarrow G = 1,77 \cdot 10^6 \text{ kg / hm}^2.$$

- La vitesse linéaire d'écoulement du Therminol SP dans les tubes de la zone de convection est :

$$U = G / \rho ; \text{ avec } G = 491,66 \text{ kg / sm}^2.$$

$$\text{D'où } U = 0,697 \text{ m / s.}$$

- Le régime d'écoulement est donc :

$$Re = (491,66.129,838 \cdot 10^{-3}) / 0,456.10^{-3} \Rightarrow \mathbf{Re = 1,4 \cdot 10^5 > 10^4}.$$

Le régime d'écoulement de l'huile chaude dans les serpentins de four est un régime turbulent.

Le coefficient de transfert thermique en régime turbulent est calculé d'après l'équation (06) pour cela on détermine :

2-2) Calcul du nombre de Prandtl Pr :

$$\text{La formule (03) donne : } Pr = (0,658.0,456.10^{-3}).3600 / 0,086 \Rightarrow \mathbf{Pr = 12,56}$$

2-3) Calcul ϕ_t :

$$\phi_t = \left(\frac{\mu}{\mu_t} \right)^{0,14} : \text{le coefficient correctif de viscosité}$$

La température du peau des tubes est de 500°C alors: $\mu_{500^\circ\text{C}} = 0,127 \cdot 10^{-3} \text{Pa.s}$

$$\text{Donc le coefficient } \phi_t = (0,456 / 0,127)^{0,14} \Rightarrow \mathbf{\phi_t = 1,19}.$$

L'application de l'équation (06) donne :

$$Nu = 0,023. (1,4.10^5)^{0,8}.(12,56)^{1/3}.1,19 \Rightarrow \mathbf{Nu = 832,73}$$

L'équation (04) donne :

$$h_{ri} = (0,086.832,73) / 129,838 \cdot 10^{-3} \Rightarrow \mathbf{h_{ri} = 551,57 \text{ kcal} / \text{h m}^2 \text{ }^\circ\text{C}}.$$

2-4) Calcul les pertes de charge (ΔP) à l'intérieur des tubes:

Les pertes de charge dues au frottement du Therminol SP à l'intérieur des tubes sont données par la formule (N°07) :

Avec :

-F: Coefficient du frottement qui caractérise la nature et l'état de surface interne des tubes, $F = f$ (de régime d'écoulement, l'état de surface des parois).

$$F = 0,0035 + (0,264 / Re^{0,42}), Re = 1,4 \cdot 10^5 \Rightarrow F = 0,0053$$

- $d = 0,705$.

- $G = 491,66 \text{ kg/sm}^2$.

Pour le diamètre de 12,98cm des tubes de convection, le coefficient de perte de charge pour les coudes est de $k = 19,7$

D'après la formule (*07) on a :

$$\Delta P_r = \frac{0,0053.(491,66)^2.16,4}{129,838.10^{-3}.0,705.1,19} \cdot 10^{-5} + \frac{19,7.(0,697)^2.0,264}{148,2}$$

$$\Delta P_r = 1,94 \text{ bar}$$

3-Calcul du coefficient de transfert (h_{ci}) et les pertes de charge ΔP_c côté tube dans la zone de convection :

Le calcul est basé sur l'équation (04) :

3-1) Détermination du régime d'écoulement :

$$Re = \rho \frac{U.D_i}{\mu} = \frac{G.D_i}{\mu}, \text{ Avec } D_i : \text{ le diamètre des tubes dans la zone de convection}$$

$$- G = m / a_t$$

$$- m: \text{ débit massique du Therminol SP, } m = 468,15 \cdot 10^3 \text{ kg / h}$$

$$- D_i = 155,858 \text{ mm.}$$

$$- a_t = 0,19 \text{ m}^2.$$

Alors la vitesse massique du Therminol SP dans les tubes de convection est de :

$$G = 468,15 \cdot 10^3 / 0,19 = 2,46 \cdot 10^6 \text{ kg / h m}^2 \Rightarrow G = 684,42 \text{ kg / s m}^2.$$

- La vitesse d'écoulement de la charge dans la section de convection est :

$$U = G / \rho \Rightarrow U = 0,97 \text{ m / s.}$$

- Le régime d'écoulement d'après la formule (01) est :

$$Re = (684,42 \cdot 155,858 \cdot 10^{-3}) / 0,456 \cdot 10^{-3} \Rightarrow Re = 2,33 \cdot 10^5 > 10^4.$$

Le régime d'écoulement de l'huile chaude dans les tubes de la zone de convection est un régime turbulent, le coefficient de transfert interne (h_{ci}) est donné par la formule (04).

3-2) Calcul du nombre de Prandtl Pr :

L'application de l'équation (03) donne :

$$Pr = (0,658 \cdot 0,456 \cdot 10^{-3}) \cdot 3600 / 0,086 \Rightarrow Pr = 12,56$$

3-3) Calcul ϕ_t :

$\phi_t = \left(\frac{\mu}{\mu_t} \right)^{0,14}$: le coefficient correctif de viscosité du Therminol SP dans la zone de convection.

La température de la peau des tubes est de 350 °C.

$$\text{Alors à } T = 350 \text{ °C, } \mu_{350^\circ\text{C}} = 0,262 \cdot 10^{-3}$$

Le coefficient correctif donc est : $\phi_t = 1,08$.

L'équation (06) donne:

$$Nu = 0,023.(2,33.10^5)^{0,8} . (12,56)^{1/3} . 1,08 \Rightarrow Nu = 1135,96$$

L'équation (04) donne:

$$h_{ci} = (0,086.1135,96) / 155,858 \cdot 10^{-3} \Rightarrow h_{ci} = 626,8 \text{ kcal / h m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

3-4) Calcul les pertes de charge (ΔP) à l'intérieur des tubes dans la section de convection :

Les pertes de charge dues au frottement du Therminol SP à l'intérieur des tubes dans la zone de convection sont données par la formule (N°07) :

Pour les tubes de types acier ASTM A106GrB le coefficient du frottement donné par la formule : $F = 0,0035 + (0,264 / Re^{0,42})$, $Re = 2,33 \cdot 10^5 \Rightarrow F = 0,0049$.

$$- G = 684,42 \text{ kg / sm}^2.$$

Pour le diamètre de 15,58cm des tubes de convection, le coefficient de perte de charge pour les coudes est de $k=25$

D'après la formule (*07) on a :

$$\Delta P_c = \frac{0,0049.(684,42)^2 . 5,79}{155,858 . 10^{-3} . 0,705 . 1,09} . 10^{-5} + \frac{25.(0,97)^2 . 0,19}{148,2}$$

$$\Delta P_c = 1,14 \text{ bar}$$

Le perte de charge totale dans le four sera donc : $\Delta P_T = \Delta P_r + \Delta P_c$

$$\Rightarrow \Delta P_T = 1,94 + 1,14$$

$$\Delta P_T = 3,08 \text{ bar}.$$

$\Delta P_T = 3,08 \text{ bar} < 3,5 \text{ bar}$. Pertes de charge admissibles.

❖ Interprétation des résultats de calculs :

Les résultats de calcul des coefficients de transfert thermique et les pertes de charge à l'intérieur des tubes pour les deux cas d'huile caloporteuse sont représentés dans le tableau ci-dessous :

Tableau n°20 :

paramètres	Cas actuel Therminol 66		Cas d'utilisation du Therminol SP	
	Zone de radiation	Zone de convection	Zone de radiation	Zone de convection
Débit massique (kg /h)	$534 \cdot 10^3$	$534 \cdot 10^3$	$468,15 \cdot 10^3$	$468,15 \cdot 10^3$
Section de passage (m ²)	0,264	0,19	0,264	0,19

Vitesse massique (kg/sm ²)	561,86	780,70	491,66	684,42
Vitesse linéaire (m /s)	0,668	0,928	0,697	0,97
Nombre de Reynolds	1,36 .10 ⁵	2,27 .10 ⁵	1,4.10 ⁵	2,33 .10 ⁵
Nombre de Prandlt	13,05	13,05	12,56	12,56
Nombre de Nusselt	803,31	1116,35	831,93	1135,96
Coefficient de film (kcal/m ² h°C)	525,89	608,82	551,57	626,8
Pertes de charge pour chaque zone (bar)	2,19	1,28	1,94	1,14
Pertes de charge total (bar)	3,47		3,08	

La comparaison entre ces résultats de calcul des coefficients du film à l'intérieur des tubes du four, 141 / F-01 montre que dans le cas d'utilisation du Therminol SP comme huile caloporteuse le coefficient de film est plus élevé que dans le cas actuel où l'huile caloporteuse est le Therminol 66 .

Cette variation du coefficient due principalement à l'augmentation de la vitesse de circulation du Therminol SP dans les tubes de four et aux propriétés de transfert de l'huile.

On trouve aussi que les pertes de charge du Therminol SP est admissible (< 3,5 bar) et inférieur a celle du Therminol 66.

II- Calcul thermique du l'aeroréfrigérant''141 / EA-01'' :

Les caractéristiques du 141 /EA-01 sont les suivantes : L'Aeroréfrigérant 141/EA -01 utilisé dans le système huile chaude (Unité 141) ayant pour but de refroidir un certain débit d'huile diathermique provenant du four 141 /F-01 afin de maintenir une température stable (215 °C) entrée four, en fonction de la température de retour des échangeurs des unités de traitement. Le 141 / EA-01 est de type à air forcé, l'air circule à travers des faisceaux horizontaux ailetés à ailettes extrudées.

Caractéristiques du l'aeroréfrigérant 141 / EA-01 :

- Nombre des tubes : $N_t = 100$ tubes.
- Nombre de passe : $n_p = 2$ passes.
- Nombre de rangés : $N_R=2$.

- Longueur des tubes : $L = 1014,4$ cm.
- La surface d'échange $A_{\text{inst}} = 182,13 \text{ m}^2$
- Diamètre extérieur des tubes $d_0 = 2,54$ Cm
- Diamètre interne des tubes $d_i = 1,93$ cm
- Diamètre externe avec ailettes des tubes : $d_r = 2,57$ cm.
- Longueur de l'ailette : $l = 1,5727$ cm.
- Epaisseur de l'ailette : $t = 0,22$ cm.
- Diamètre de l'ailette : $d_F = 5,715$ cm.
- Espacement entre ailettes : $e = 0,04064$ cm
- Température entrée d'air : $t_e = 45$ °C.
- Température sortie d'air : $t_s = 122$.
- Débit d'air $m = 253,2 \cdot 10^3$ kg /h.
- Pertes de charge admissibles : $\Delta P = 0,55$ bar

❖ **Situation actuelle : Therminol 66 comme fluide caloporteur :**

Tableau n°21 :

Données process de la charge	coté tube (huile chaude)	Coté air
Température entrée T_e (°C)	302	45
Température sortie T_s (°C)	200	122
Débit massique M (kg/h)	$80 \cdot 10^3$	$253,2 \cdot 10^3$

Propriétés thermiques moyennes aux conditions de service (T_{moy}) :

Tableau n°22 :

Propriétés thermiques	Coté tube (Therminol 66)	Coté air
Masse volumique ρ (kg/m ³)	847,14	0,987
Chaleur spécifique C_p (kcal/kg.°C)	0,57	0,2415
Conductivité thermique λ (kcal/h.m°C)	0,086	0,0261
Viscosité dynamique μ (Pa.s)	$0,566 \cdot 10^{-3}$	$0,021 \cdot 10^{-3}$
Résistance d'encrassement R_s	$4 \cdot 10^{-4}$	$1,51 \cdot 10^{-4}$

(h.m ² .°C /kcal)		
------------------------------	--	--

1- Calcul de la quantité de chaleur "Q" :

La quantité de chaleur qu'il faut extraire du Therminol 66 est donnée par la formule suivante : $Q = M C_p \Delta T$.

$$\Rightarrow Q = 80 .10^3 .0,57 (302 - 200) \text{ d'où } Q = 4,65 .10^6 \text{ kcal / h.}$$

2- Calcul du coefficient interne " h_i " du Therminol 66 : [5]

Pour cela il faut calculer :

2-1) Calcul de nombre de Reynolds : Régime d'écoulement :

.- L'application de la formule (05) donne : $a_t = \frac{\pi.(19,3.10^{-3})^2.100}{4.2} = 1,46.10^{-2} m^2$.

$$G = m / a_t = (80.10^3 / 1,46 .10^{-2}) = 5,47 .10^6 \text{ kg / hm}^2 \Rightarrow G = 1,52 .10^3 \text{ kg / S m}^2$$

- La vitesse de circulation de la charge à l'intérieur des tubes est : $U = (G / \rho)$

$$U = (1,52. 10^3) / 847,14 \Rightarrow U = 1,794 \text{ m/s.}$$

L'équation (02) donne : $Re = (1,93 .10^{-2} .1,52 .10^3) / 0,566 .10^{-3} \Rightarrow Re = 5,18.10^4 > 10^4$

Le régime d'écoulement de la charge dans l'aeroréfrigérant, donc est un régime turbulent.

Le coefficient du film du Therminol 66 à l'intérieur des tubes s'écrit alors sous la forme suivante:

$$Nu = \frac{h_i . d_i}{\lambda} = j_h . Pr^{\frac{1}{3}} . \left(\frac{\mu}{\mu_t} \right)^{0,14} \dots\dots\dots (08).$$

$$\text{tel que } j_h = 0,027 Re^{0,8} \dots\dots\dots (09).$$

2-2) Calcul le Nombre de Prandlt "Pr" :

$$Pr = (C_p \mu) / \lambda = (0,57.0,566.10^{-3}) .3600 / 0,086 \Rightarrow Pr = 13,50.$$

2-3) Calcul le constant j_h :

, d'après la formule n° (09) lorsque $Re = 5,18.10^4$ on trouve $j_h = 159,52$.

$$\phi_t = \left(\frac{\mu}{\mu_t} \right)^{0,14} \text{ le facteur de correction de viscosité on prend : } \phi_t = 1.$$

$$\text{L'application de la formule (08) donne : } Nu = 159,52.13,5^{\frac{1}{3}} \Rightarrow N_u = 379,83.$$

$$\frac{h_i \cdot 193 \cdot 10^{-2}}{0,086} = 379,83 \Rightarrow h_i = 1692,5 \text{ kcal / h.m}^2 \cdot ^\circ\text{C}.$$

3-Calcul du coefficient de transfert de l'air aux conditions de service “ h_a ”:[5]

Le coefficient de film “ h_a ” au condition de service donné par la formule de E.BRIGGS et E.YOUNG.

$$h_a = 0,134 \left(\frac{d_r \cdot G_a}{\mu_a} \right)^{0,681} \cdot (Pr_a)^{1/3} \cdot (e/l)^{0,2} \cdot (e/t)^{0,1134} \cdot (\lambda/d_r) \cdot (A_T/A_0) \quad [\text{kcal/hm}^2 \cdot ^\circ\text{C}] \dots\dots$$

(10).

Le rapport $A_T/A_0 = 23,4$ (rapport de la surface ailetée et la surface externe des tubes).

La vitesse massique de l'air à travers les tubes ailetés est :

$$G_a = \left(\frac{m}{F_a} \right)^* \cdot \left(\frac{V_m}{V_F} \right) \quad [\text{kg/sm}^2] \dots\dots\dots (11).$$

Avec le rapport $\left(\frac{V_m}{V_F} \right) = 2$ et la surface faciale $F_A = 0,9 \cdot \left(\frac{A_{inst}}{N_R} \right) \quad [\text{m}^2]$.

La surface installée de l'aéroréfrigérant A_{inst} qui est celle existante.

$$A_{inst} = \pi \cdot d_0 \cdot L \cdot N_t \quad [\text{m}^2] \dots\dots\dots (12).$$

$$A_{inst} = 80,9 \text{ m}^2 \Rightarrow F_a = 36,4 \text{ m}^2$$

$$\text{d'après (11)} \quad G_a = 13910,17 \text{ kg/s m}^2 = 3,86 \text{ kg/h m}^2$$

on a $Pr_a = 0,7$.

$$h_a = 357,18 \text{ kcal/h m}^2 \cdot ^\circ\text{C}.$$

4- Calcul du coefficient global de transfert “ U_s ”:[5]

Le coefficient global de transfert “ U_s ” basé sur la surface externe totale est déterminé d'après la formule suivants:

$$\frac{1}{U_s} = \frac{1}{h_a} + \frac{1}{h_i} \cdot \left(\frac{d_0}{d_i} \right) + R_m + R_s \cdot \left(\frac{d_0}{d_i} \right) \quad [\text{h m}^2 \cdot ^\circ\text{C/kcal}] \dots\dots\dots (13).$$

Avec:

$$R_s = 4 \cdot 10^{-4} \quad [\text{h.m}^2 \cdot ^\circ\text{C/kcal}].$$

$$R_m = 1,51 \cdot 10^{-4} \quad [\text{h.m}^2 \cdot ^\circ\text{C/kcal}].$$

$$h_a = 357,18 \quad [\text{kcal/hm}^2 \cdot ^\circ\text{C}].$$

$$h_i = 1692,5 \quad [\text{kcal/hm}^2 \text{ } ^\circ\text{C}].$$

$$d_0/d_i = 1,316$$

$$\text{on trouve que: } U_s = 235,03 \quad [\text{kcal/h.m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}].$$

la verifications de surface d'échange est basée sur la formule suivante:

$$A_{ech} = Q/(U_s \cdot \Delta TLM) \quad (\text{m}^2) \quad \dots\dots\dots(14).$$

Telque:

$$Q = 4,65 \cdot 10^6 \text{ kcal/h.}$$

$$U_s = 235,03 \text{ kcal/hm}^2 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

ΔTLM : la différence de température moyenne logarithmique $[\text{ } ^\circ\text{C}]$.

$$\Delta TLM = \frac{\Delta T_2 - \Delta T_1}{\ln\left(\frac{\Delta T_2}{\Delta T_1}\right)} \quad \dots\dots\dots(15).$$

$$\Delta T_2 = T_e - t_s \Rightarrow \Delta T_2 = 180^\circ\text{C} \quad .$$

$$\Delta T_1 = T_s - t_e \Rightarrow \Delta T_1 = 155^\circ\text{C}.$$

$$(13) \Rightarrow \Delta TLM = 167,18 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

D'où on trouve que :

$$A_{ech} = 118,34 \text{ m}^2.$$

5-Calcul des pertes de charge " ΔP " : [5]

Les pertes de charge dues au frottement du Therminol 66 dans les tubes de l'aeroréfrigérant sont déterminées d'après la formule suivante :

$$\Delta P = n_p \cdot \rho \cdot U^2 \left(F_t \cdot \frac{L}{d_i} + 2 \right) , \quad [\text{Pas}] \quad \dots\dots\dots(16).$$

F_t : Facteur de friction, déterminé graphiquement en fonction de Re (Voir annexe n°03).

$$Re = 5,18 \cdot 10^4 \Rightarrow f_t = 0,015$$

$$\Delta P = 2.847,14 \cdot (1,794)^2 (0,015 \cdot \frac{1014,4}{1,93} + 2) = 5,38 \cdot 10^4 \text{ Pas.}$$

$$\Delta P = 0,53 \text{ bar} .$$

❖ Cas d'utilisation du Therminol SP :

La Chaleur échangée : $Q = 4,65 \cdot 10^6 \text{ kcal/h.}$

-Les propriétés thermiques du Therminol SP sont déterminées à la température moyenne de service : $T_{\text{moy}} = 251 \text{ }^{\circ}\text{C}$.

- Température entrée : $T_e = 302 \text{ }^{\circ}\text{C}$.
- Température de sortie : $T_s = 200 \text{ }^{\circ}\text{C}$.
- Chaleur spécifique moyenne : $C_p = 0,651 \text{ kcal/kg }^{\circ}\text{C} = 2,722 \text{ kJ/kg}^{\circ}\text{C}$.
- Viscosité dynamique : $\mu = 0,486 \cdot 10^{-3} \text{ Pa.s}$
- Conductivité thermique : $\lambda = 0,087 \text{ kcal/hm}^{\circ}\text{C} = 0,102 \text{ W/mK}$.
- Masse volumique moyenne : $\rho = 710,3 \text{ kg/m}^3$.

1 - Détermination du débit du Therminol SP nécessaire pour l'échange thermique dans le 141 / EA-01 :

L'application de l'équation (01) donne : $m = \frac{Q}{C_p \Delta T} = \frac{4,65 \cdot 10^6}{0,651(302 - 200)} = 68522 \text{ kg/h}$.

Alors le débit nécessaire au fonctionnement est : **$m = 68522 \text{ kg/h}$** .

2-Calcul du coefficient de film à l'intérieur des tubes du l'aeroréfrigérant " h_i ":

2-1) Détermination du régime d'écoulement " Re" :

Le régime d'écoulement du Therminol SP dans les tubes de 141/EA-01 est déterminé d'après la formule n° (02).

- G : la vitesse massique de circulation de la charge dans les tubes:

$$G = m / a_t = 68522 / 1,46 \cdot 10^{-2} \Rightarrow G = 4,69 \cdot 10^6 \text{ kg / hm}^2, \text{ d'où } \mathbf{G = 1303,69 \text{ kg / sm}^2}.$$

- La vitesse linéaire est : $U = (G / \rho) = 1303,69 / 710,3 \Rightarrow \mathbf{U = 1,83 \text{ m/s}}$.

La formule (02) donne : $Re = (1,93 \cdot 10^{-2} \cdot 1303,69) / 0,468 \cdot 10^{-3} \Rightarrow \mathbf{Re = 5,17 \cdot 10^4}$.

$Re > 10^4$, le coefficient du film du Therminol SP est calculé d'après la formule (04).

$$\phi_t = \left(\frac{\mu}{\mu_t} \right)^{0,14} : \text{Facteur de correction du viscosité, on prend } \phi_t = 1.$$

2-2) Calcul Pr :

La formule n°(03) donne : $Pr = (0,651 \cdot 0,486 \cdot 10^{-3} \cdot 3600) / 0,087 \Rightarrow \mathbf{Pr = 13,09}$.

2-3) Calcul le constant j_h :

$$J_h = 0,027 \cdot Re^{0,8} = 0,027 \cdot (5,17 \cdot 10^4)^{0,8} \Rightarrow \mathbf{j_h = 159,27}.$$

L'application de la formule (08) donne : $Nu = 159,27.13,09^{1/3} \Rightarrow N_u = 375,35$.

D'après (04) on a :

$$\frac{h_i.1,93.10^{-2}}{0,087} = 375,35 \Rightarrow h_i = 1692 \text{ kcal / h.m}^2.\text{°C}.$$

3- Calcul de coefficient global de transfert "U_s":

$$\frac{1}{U_s} = \frac{1}{h_a} + \frac{1}{h_i} \left(\frac{d_o}{d_i} \right) + R_m + R_s \left(\frac{d_o}{d_i} \right) \quad [\text{h m}^2 \text{°C/k cal}].$$

Avec:

$$h_a = 357,18 \quad [\text{kcal/hm}^2\text{°C}] \quad \text{déjà calculé}$$

$$R_s = 4.10^{-4} \quad [\text{h.m}^2.\text{°C/kcal}]$$

$$R_m = 1,51.10^{-4} \quad [\text{h.m}^2.\text{°C/kcal}]$$

$$h_i = 1692 \quad [\text{kcal/hm}^2 \text{°C}]$$

$$d_o/d_i = 1,316$$

on trouve que: $U_s = 235,02 \text{ [kcal/h.m}^2\text{°C]}.$

la verifications de surface d'échange est basée sur la formule suivante:

$$A_{ech} = Q / (U_s . \Delta T_{im}) \quad (\text{m}^2).$$

Telque :

$$Q = 4,65.10^6 \text{ kcal/h.}$$

$$U_s = 235,02 \text{ kcal/hm}^2\text{°C}.$$

$$\Delta T_{LM} = 167,18 \text{ °C.}$$

$$\text{Donc on trouve } A_{ech} = 118,34 \text{ m}^2.$$

4-Calcul des pertes de charge "ΔP " :

Les pertes de charge dues au frottement du Therminol SP dans les tubes de l'aeroréfrigérant sont déterminées d'après la formule n°16.

avec :

F_t : Facteur de friction, déterminé graphiquement en fonction de Re (Voir annexe n°03).

$$Re = 5,17 . 10^4 \Rightarrow F_t = 0,015.$$

$$\Delta P = 2.710,3.(1,83)^2(0,015.\frac{1014,4}{1,93} + 2) = 4,7.10^4 \text{ Pas}$$

$\Delta P = 0,47$ bar.

❖ **Interpolation de calcul:**

Les résultats de calcul sont indiqués dans le tableau ci-dessous :

Tableau n°23 :

paramètres	Cas actuel Therminol 66	Cas d'utilisation du Therminol SP
Débit de la charge M (kg/h)	80000	68522
Chaleur échangée Q (kcal /h)	$4,65.10^6$	$4,65.10^6$
Nombre de Reynolds Re	$5,18.10^4$	$5,17.10^4$
Nombre de prands Pr	13,50	13,09
Section de passage a_t (m ²)	$1,46.10^{-2}$	$1,46.10^{-2}$
Vitesse massique d'écoulement de la charge G (kg/s.m ²)	$1,52.10^3$	1303,69
Vitesse de circulation u (m /s)	1,794	1,83
Coefficient j_h	159,52	159,27
Nombre de Nusselt Nu	379,83	375,35
Coefficient interne de l'huile h_i (kcal/h.m ² °C)	1692,5	1692
Coefficient global de transfert U_s (Kcal/h.m ² °C)	235,03	253,02
ΔTLM (°C)	167,18	167,18
Surface d'échange nécessaire (m ²)	118,34	118,34
Facteur de friction	0,015	0,015
Pertes de charge (bar)	0,53	0,47

Le tableau ci-dessus montre qu'il existe un approche d'échange thermique dans les deux cas d'utilisation d'une huile caloporteuse, soit le cas actuelle ou le cas proposée.

III- Calcul Thermique du rebouilleur '' 10 /E-08''

Le rebouilleur 10/E-08 à pour but d'assurer la chaleur de rebouillage au fond de déethaniseur 10/C-01 à une température de 155 °C, une chaleur nécessaire pour le fractionnement de mélange GPL- Condensat et le gaz sec. La source des calories

est de l'huile diathermique chaude provenant de système huile chaude à une température de 300°C.

Caractéristiques du rebouilleur 10/E-08 :

- Côté tubes : Therminol 66 en écoulement mono-phasique sans ébullition.
- Nombre des tubes: $N_t = 442$ tubes.
- Diamètre intérieure des tubes $d_i = 1,483 \cdot 10^{-2}$ m.
- Diamètre extérieur des tubes : $d_o = 1,9 \cdot 10^{-2}$ m
- Longueur des tubes : $L = 8$ m.
- Nombre de passe côté calandre : $n_c = 1$.
- Nombre de passe côté tube : $n_t = 2$.
- Pertes de charge tolérée : $\Delta P = 0,5$ bar.

❖ **Situation actuelle : Therminol 66 comme fluide caloporteur.**

Tableau n°24 :

Données process de la charge	Coté tube (Therminol 66)	Coté calandre (c_3^+)
Température entrée T_e (°C)	300	129,9
Température sortie T_s (°C)	200	155,5
Débit massique M (kg/h)	124520	96062

Propriétés thermiques moyennes aux conditions de service ($T_{\text{moy}} = 250^\circ\text{C}$) :

Tableau n°25 :

Masse volumique ρ (kg/m ³)	847,9	454
Chaleur spécifique C_p (kcal/kg.°C)	0,569	0,775
Conductivité thermique λ (kcal/h.m°C)	0,086	0,078
Viscosité dynamique μ (Pa.s)	$0,57 \cdot 10^{-3}$	$0,1 \cdot 10^{-3}$
Résistance d'encrassement R_s (h.m ² .°C /kcal)	$4 \cdot 10^{-4}$	$2 \cdot 10^{-4}$

1-Calcul de la quantité de chaleur fournie au 10 /E-08 "Q" :

La quantité de chaleur qu'il faut extraire du Therminol 66 est donnée par la formule n° 01: $\Rightarrow Q = 124,52 \cdot 10^3 \cdot 0,569 \cdot (300 - 200) \Rightarrow Q = 7,08 \cdot 10^6$ kcal / h.

2- Calcul du coefficient interne " h_i " coté tube :

Le calcul est basé sur la formule n° 04

2-1) Calcul du nombre de Reynolds (Régime d'écoulement):

-Le régime d'écoulement est donné par l'équation n° 02 :

Avec:

a_t : Section de passage de l'huile dans les tubes déterminée d'après la formule n°05

- L'application de la formule (05) donne : $a_t = \frac{\pi \cdot (14,83 \cdot 10^{-3})^2 \cdot 442}{4 \cdot 2} = 3,81 \cdot 10^{-2} \text{ m}^2$.

$G = M / a_t = (124, 52.103 / 3, 81 \cdot 10^{-2}) = 3,268 \cdot 10^6 \text{ kg} / \text{hm}^2 \Rightarrow G = 907,84 \text{ kg} / \text{S m}^2$.

-La vitesse linéaire de circulation de la charge à l'intérieur des tubes est:

$$U = (G / \rho)$$

$$U = (907,84) / 847,9 \Rightarrow U = 1,07 \text{ m/s.}$$

L'équation (02) donne : $Re = \frac{907,84 \cdot (1,483 \cdot 10^{-2})}{0,57 \cdot 10^{-3}} \Rightarrow Re = 2,36 \cdot 10^4 > 10^4$

L'écoulement de l'huile chaude à l'intérieur de serpentin des tubes dans le rebouilleur est un régime turbulent.

Le coefficient du film du Therminol 66 à l'intérieur des tubes est déterminé d'après la formule n° (06), pour ce la, on détermine :

2-2) calcul du nombre de Prandlt " Pr " :

$$Pr = (Cp \mu) / \lambda = (0,569 \cdot 0,57 \cdot 10^{-3} \cdot 3600) / 0,086 \Rightarrow Pr = 13,57.$$

- $\phi_t = \square (\mu / \mu_t)^{0,14}$: Facteur de correction du viscosité, on prend : $\phi_t = 1$.

L'application de la formule (06) donne :

$$\frac{h_i \cdot 1,483 \cdot 10^{-2}}{0,086} = 0,023 \cdot (2,36 \cdot 10^4)^{0,8} \cdot (13,57)^{\frac{1}{3} \cdot 1} \quad \text{d'où}$$

$$h_i = 1002,17 \text{ kcal} / \text{h.m}^2 \cdot ^\circ\text{C.}$$

3- Calcul du coefficient de transfert " h_{eb} " coté calandre : [5]

Le produit circulant coté calandre est en ébullition, le calcul de coefficient de transfert en ébullition de produit " h_{eb} " est déterminé d'après la corrélation de MOSTINSKI

$$h_{eb} = 3,75.10^{-5} \left(\frac{Q}{A_{ins}} \right)^{0,7} . P_C^{0,69} . F_P \quad [w/m^2 .K] \quad \dots\dots\dots(17)$$

Avec :

Q : débit de chaleur échangée, $Q = 7,08.10^6 \text{ kcal/h} = 8,22.10^6 \text{ w}$.

A_{ins} : surface d'échange installée, $A_{ins} = 210,96 \text{ m}^2$.

P_c : pression critique du mélange coté calandre, $P_c = 34,461.10^5 \text{ Pas}$.

F_p : facteur de correction de pression, $F_p = 1,8(P_s / P_c)^{0,17}$

Tel que P_s : pression de service, $P_s = 31,4 \text{ bar}$.

D'où $F_p = 1,77$.

Donc $h_{eb} = 3517,47 \text{ (w /m}^2 \text{ .K)}$. $\Rightarrow h_{eb} = 3029,4 \text{ (kcal/m}^2 \text{ .K)}$

4-calcul du coefficient d'échange globale "U_s" : [5]

Le calcul est basé sur la formule suivante :

$$\frac{1}{U_s} = \frac{1}{h_{nb}} + \frac{1}{h_i} \left(\frac{d_0}{d_i} \right) + R_{sc} + R_{st} \left(\frac{d_0}{d_i} \right) \quad [h \text{ m}^2 \text{ °C/kcal}]. \quad \dots\dots\dots(18)$$

Avec:

$$h_{nb} = h_{eb} . F_b + h_{nc}$$

F_b : facteur de correction des faisceaux , $F_b = 1,5$.

h_{nc} : coefficient de transfert en convection, $h_{nc} = 250 \text{ w/m}^2 \text{ K} = 215,31 \text{ kcal/h m}^2 \text{ °C}$

Donc on trouve $h_{nb} = 4759,41 \text{ kcal/h m}^2 \text{ °C}$.

$$R_{sc} = 2 . 10^{-4} \quad h \text{ m}^2 \text{ °C /k cal.}$$

$$R_{st} = 4 . 10^{-4} \quad h \text{ m}^2 \text{ °C /k cal.}$$

$$d_0/d_i = 1,281.$$

L'application de la formule n° (18) donne:

$$\frac{1}{U_s} = 0,0022 \quad [h.m^2 .°C/kcal] \Rightarrow U_s = 454,39 \text{ kcal/h .m}^2 \text{ .°C}$$

-la surface d'échange est calculée d'après la formule suivante :

$$A_{ech} = Q / (U_s . \Delta T_{im}) \quad (\text{m}^2)$$

Avec :

$$Q = 7,08 . 10^6 \quad \text{kcal/h}$$

$$U_s = 454,39 \quad \text{kcal/h m}^2 \text{ °C}$$

$$\Delta T_{LM} = \frac{\Delta T_2 - \Delta T_1}{\ln\left(\frac{\Delta T_2}{\Delta T_1}\right)}$$

$$\Delta T_2 = T_e - t_s \Rightarrow \Delta T_2 = 144,5^\circ\text{C}$$

$$\Delta T_1 = T_s - t_e \Rightarrow \Delta T_1 = 70,1^\circ\text{C}$$

$$\Rightarrow \Delta T_{LM} = 102,85^\circ\text{C}$$

D'où on trouve que $A_{ech} = 151,49 \text{ m}^2$

5- Calcul de la température de paroi : [5]

Le calcul est basé sur la formule suivant :

$$\frac{T_e - T_p}{T_s - T_p} = \exp\left(\frac{T_e - T_s}{\Delta T_{LM}}\right) = \exp\left(\frac{300 - 200}{102,85}\right) = 2,644 \Rightarrow T_p = 139,17^\circ\text{C}$$

6- Calcul des pertes de charge coté tube : [5]

Les pertes de charge dues au frottement d'après la formule suivantes:

$$\Delta P_t = \frac{n_t \cdot G^2}{\rho} \left(\frac{f_t \cdot l}{d_i \cdot \Phi_t} + 2 \right) \quad [\text{Pas}] \dots\dots\dots (19)$$

f_t : Facteur de friction, déterminé graphiquement en fonction de Re d'après l'annexe n°03

$$Re = 2,36 \cdot 10^4 \Rightarrow F_t = 0,016.$$

$$L = n_t \cdot l \Rightarrow l = 4\text{m}$$

D'où : $\Delta P = 1,23 \cdot 10^4 \text{ Pas} \Rightarrow \Delta P = 0,123 \text{ bar}$, sachant que les pertes de charges tolérées sont : $\Delta P = 0,5 \text{ bar}$.

❖ Cas d'utilisation du Therminol SP :

- Les propriétés thermiques du Therminol SP sont déterminées à la température moyenne de service : $T_{moy} = 250^\circ\text{C}$.

- Chaleur échangée : $Q = 7,08 \cdot 10^6 \text{ kcal/h}$.
- Température entrée : $T_e = 300^\circ\text{C}$.
- Température de sortie : $T_s = 200^\circ\text{C}$.
- Masse volumique moyenne : $\rho = 711 \text{ kg/m}^3$.
- Conductivité thermique : $\lambda = 0,088 \text{ kcal/hm}^\circ\text{C}$.
- Chaleur spécifique moyenne : $C_p = 0,65 \text{ kcal/kg}^\circ\text{C}$.
- Viscosité moyenne : $\mu = 0,49 \cdot 10^{-3} \text{ Pa.s}$.

- Résistance d'encrassement $R_s = 4 \cdot 10^{-4}$ (h.m². °C /kcal).

1-Détermination du débit du Therminol SP nécessaire pour l'échange thermique dans le 10/E-08 :

L'application de l'équation (01) donne : $m = \frac{Q}{C_p \Delta T} = \frac{7,08 \cdot 10^6}{0,65(300 - 200)} = 108,92 \cdot 10^3 \text{ kg/h.}$

Alors le débit du Therminol SP nécessaire pour effectuer l'échange thermique est : $m = 108,92 \cdot 10^3 \text{ kg / h}$, ou bien un débit volumique de $v = 153,19 \text{ m}^3 / \text{h}$.

2- Calcul le coefficient de film à l'intérieur des tubes de " h_i ":

2-1) Détermination du régime d'écoulement " Re " :

Le régime d'écoulement du Therminol SP est déterminé d'après la formule n° 02.

- G : la vitesse massique de circulation de la charge dans les tubes:

$$G = m / a_t = 108,92 \cdot 10^3 / 0,0381 \Rightarrow G = 2,858 \cdot 10^6 \text{ kg / hm}^2, \text{ d'où } G = 794,1 \text{ kg / sm}^2.$$

- La vitesse linéaire est : $U = (G / \rho) = 794,1 / 711 \Rightarrow U = 1,11 \text{ m/s.}$

La formule (02) donne : $Re = (1,483 \cdot 10^{-2} \cdot 794,1) / 0,49 \cdot 10^{-3} \Rightarrow Re = 2,4 \cdot 10^4.$

$Re > 10^4$, le coefficient du film du Therminol SP est calculé d'après la formule n°06

- Facteur de correction du viscosité, on prend $\phi_t = 1$.

2-2) Calcul du nombre de Prandtl Pr :

La formule n° 03 donne : $Pr = 13,06$.

L'application de la formule (06) donne alors :

$$\Rightarrow h_i = 1026,17 \text{ kcal/hm}^2\text{°C.}$$

3- Calcul du coefficient d'échange globale " U_s ":

On applique la formule n°18 avec :

$$h_i = 1026,17 \text{ kcal/h.m}^2\text{.°C.}$$

$$R_{st} = 4 \cdot 10^{-4} \text{ h.m}^2\text{.°C/kcal.}$$

$$\text{On trouve que } \frac{1}{U_s} = 0,00217 \text{ [h.m}^2\text{.°C/kcal]}. \Rightarrow U_s = 460,65 \text{ kcal/h.m}^2\text{.°C}$$

la verifications de surface d'échange est basée sur la formule suivante:

$$A_{ech} = Q / (U_s \cdot \Delta T_{im}) \quad (\text{m}^2)$$

tel que

$$Q = 7,08 \cdot 10^6 \text{ kcal/h}$$

$$U_s = 460,65 \text{ kcal/hm}^2\text{°C}$$

$$\Delta T_{LM} = 102,85\text{°C}$$

$$\text{Donc on trouve } A_{\text{éch}} = 149,43 \text{ m}^2.$$

4- Calcul des pertes de charge " ΔP " :

Les pertes de charge dues au frottement du Therminol SP sont déterminées d'après la formule n°19.

Avec : f_t - Facteur de friction, déterminé graphiquement en fonction de Re d'après l'annexe n° 03.

$$Re = 2,4 \cdot 10^4 \Rightarrow F_t = 0,0157.$$

$$G = 794,1 \text{ kg/s m}^2.$$

$$\rho = 711 \text{ kg/m}^3.$$

$$\text{Donc : } \Delta P = 1,1 \cdot 10^4 \text{ Pas} \Rightarrow \Delta P = 0,11 \text{ bar} \text{ pertes de charge admissible } (< 0,5 \text{ bar}).$$

❖ Interpolation de calcul :

Les résultats de calcul sont indiqués dans le tableau ci-dessous :

Tableau n°26 :

Paramètres	Cas actuel Therminol 66	Cas d'utilisation du Therminol SP
Débit de la charge M (kg/h)	$124,52.10^3$	$108,92.10^3$
Chaleur échangée Q (kcal /h)	$7,08.10^6$	$7,08.10^6$
Vitesse massique d'écoulement de la charge G (kg/s.m ²)	907,84	794,1
Vitesse de circulation u (m /s)	1,07	1,11
Section de passage a_t (m ²)	$3,81.10^{-2}$	$3,81.10^{-2}$
Nombre de Reynolds Re	$2,36.10^4$	$2,4.10^4$
Nombre de prands Pr	13,57	13,06
Coefficient interne de l'huile h_i (kcal/h.m ² °C)	1002,17	1026,17
Coefficient global de transfert U_s (Kcal/h.m ² °C)	454,39	460,65
ΔTLM (°C)	102,85	102,85
Surface d'échange nécessaire A_{ech} (m ²)	151,49	149,43
Température de paroi T_p (°C)	139,17	139,17
Facteur de friction f_t	0,016	0,0157
Pertes de charge ΔP (bar)	0,123	0,11

La surface d'échange du rebouilleur déethaniseur 10/E-08 est largement suffisante pour assurer le rebouillage de la colonne dans le cas d'utilisation du Therminol SP. Les pertes de charge sont acceptables, sachant que la perte tolérée dans le rebouilleur est de 0,5 bar.

IV- Calcul Thermique du rebouilleur "10 /E-09" :

Le rebouilleur 10/E-09 à pour rôle d'assurer le débit de chaleur de rebouillage au fond du splitter GPL 10/C-01, pour garder une température de 230 °C, une chaleur nécessaire pour le fractionnement de mélange GPL- Condensat. La source

des calories est de l'huile diathermique chaude provenant du système huile chaude à une température de 300 °C.

Caractéristiques du rebouilleur 10/E-09 :

- Côté tubes : Huile diathermique en écoulement mono-phasique sans ébullition.
- Type : BKU.
- Diamètre intérieur des tubes $d_i = 14,83 \cdot 10^{-3}$ m.
- Diamètre extérieur des tubes : $d_o = 19 \cdot 10^{-3}$ m.
- Longueur des tubes : $L = 8$ m.
- Nombre des tubes: $N_t = 579$ tubes.
- Nombre de passe côté tube : $n_t = 2$ passes.
- Nombre de passe coté calandre $n_c = 1$.
- Surface d'échange installée : $A_{inst} = 276,49$ m².
- Pression de service : $P_s = 16,3$ bar.
- Pression critique de mélange coté calandre : $P_c = 28,459$ bar.
- Pertes de charge tolérée : $\Delta P = 0,5$ bar.

❖ **Situation actuelle : Therminol 66 comme fluide caloporteur.**

Tableau n°27:

Données process de la charge	Coté tube (Therminol 66)	Coté calandre (Condensat)
Température entrée T_e (°C)	300	185
Température sortie T_s (°C)	230	207
Débit massique M (kg/h)	163550	91448

Propriétés thermiques moyennes aux conditions de service ($T_{moy} = 265^\circ\text{C}$) :

Tableau n°28.

Masse volumique ρ (kg/m ³)	836,4	477
Chaleur spécifique C_p (kcal/kg.°C)	0,582	0,735
Conductivité thermique λ (kcal/h.m.°C)	0,084	0,066
Viscosité dynamique μ (Pa.s)	$0,51 \cdot 10^{-3}$	$0,1 \cdot 10^{-3}$
Résistance d'encrassement R_s (h.m ² .°C /kcal)	$4 \cdot 10^{-4}$	$2 \cdot 10^{-4}$

❖ **Cas d'utilisation du Therminol SP :**

Les propriétés thermiques du Therminol SP sont déterminées à la température moyenne de service : $T_{moy} = 265\text{ °C}$.

- Chaleur échangée : $Q = 7,08 \cdot 10^6 \text{ kcal/h}$.
- Température entrée : $T_e = 300\text{ °C}$.
- Température de sortie : $T_s = 230\text{ °C}$.
- Masse volumique moyenne : $\rho = 700 \text{ kg/m}^3$.
- Conductivité thermique : $\lambda = 0,085 \text{ kcal/hm}^\circ\text{C}$.
- Chaleur spécifique moyenne $C_p = 0,663 \text{ kcal/kg }^\circ\text{C}$.
- Viscosité moyenne : $\mu = 0,43 \cdot 10^{-3} \text{ Pa.s}$.
- Résistance d'encrassement $R_s = 4 \cdot 10^{-4} \text{ (h.m}^2 \cdot ^\circ\text{C /kcal)}$.

La méthode du calcul de la quantité de chaleur échangée, le coefficient du film, surface d'échange et les pertes de charge du fluide caloporteur sont déterminés d'après les équations précédentes, même méthode que celle de 10/ E-08.

❖ **Interpolation de calcul :**

Les résultats de calcul des deux cas, sont indiqués dans le tableau ci –dessous :

Tableau n°29 :

Paramètres	Cas actuel Therminol 66	Cas d'utilisation du Therminol SP
Débit de la charge M (kg/h)	163350	$1,43.10^5$
Chaleur échangée Q (kcal /h)	$6,65 .10^6$	$6,65.10^6$
Vitesse massique d'écoulement de la charge G (kg/s.m ²)	907,5	796,04
Vitesse de circulation u (m /s)	1,08	1,13
Section de passage a_t (m ²)	0,05	0,05
Nombre de Reynolds Re	$2,63.10^4$	$2,74.10^4$

Nombre de prands Pr	12,72	12,07
Coefficient interne de l'huile h_i (kcal/h.m ² °C)	1044,7	1073,34
Coefficient global de transfert U_s (Kcal/h.m ² °C)	442,69	449,2
ΔTLM (°C)	66,12	66,12
Surface d'échange nécessaire A_{ech} (m ²)	227,18	223,9
Température de paroi T_p (°C)	192,76	192,76
Facteur de friction f_t	0,015	0,0147
Pertes de charge ΔP (bar)	0,119	0,108

Ces résultats montrent que la surface d'échange actuelle est suffisante pour effectuer le transfert thermique désiré, avec une perte de charge acceptable (perte de charge admissible est de 0,5 bar).

V- Calcul thermique du réchauffeur régénérateur du déshydrateur gaz

''10/E-10''

Le réchauffeur 10/E-10 échangeur de type faisceau et calandre à pour but d'assurer le chauffage du gaz de régénération de déshydrateur gaz à tamis moléculaire (10 / V-04 A/B/C) pendant la phase de réchauffage à une température de 275 °C.

Le réchauffage se fait par l'utilisation du Therminol 66 provenant du système huile chaude (unité 141) pour une rampe de chauffage de 05 heures pour chacun des déshydrateurs.

Caractéristiques du réchauffeur 10/ E-10:

- Type : Faisceau et Calandre.
- Diamètre de la calandre : $D_c = 0,559$ m.
- Espace entre chicane : $B = 0,35$ m.
- Diamètre intérieur des tubes $d_i = 0,01478$ m
- Diamètre extérieur des tubes : $d_o = 0,019$ m .

- Longueur des tubes : $L = 9$ m.
- Nombre des tubes: $N_t = 360$ tubes.
- Nombre de passe côté calandre : $n_c = 1$.
- Nombre de passe côté tube : $n_t = 1$.
- Le pas des tubes $P=0,0254$ m ,de type triangulaire simple .
- Pertes de charge tolérée : $\Delta P = 0,7$ bar.
- Surface installé $A_{ins}=193,3$ m².

❖ **Situation actuelle : Therminol 66 comme fluide caloporteur.**

Tableau n° 30 :

Données process de la charge	Coté tube (gaz de régénération)	Coté calandre (Therminol 66)
Température entrée T_e (°C)	33,5	300
Température sortie T_s (°C)	275	225
Débit massique M (kg/h)	28400	108.10^3

Propriétés thermiques moyennes aux conditions de service (T_{moy}) :

Tableau n° 31 :

Masse volumique ρ (kg/m ³)	71,281	838,35
Chaleur spécifique C_p (kcal/kg.°C)	0,681	0,58
Conductivité thermique λ (kcal/h.m°C)	0,049	0,085
Viscosité dynamique μ (Pa.s)	0,0000159	$0,52.10^{-3}$
Résistance d'encrassement R_s (h.m ² .°C /kcal)	2.10^{-4}	2.10^{-4}
Densité d	0,7	0,838

1-Détermination de la quantité de chaleur échangée " Q " :

La quantité de chaleur échangée est déterminée d'après la formule n° 01.

$$Q = 108 \cdot 10^3 \cdot 0,58 \cdot (300 - 225) \Rightarrow Q = 4,7 \cdot 10^6 \text{ kcal / h.}$$

2- Calcul du coefficient de film côté Therminol 66 (côté calandre) " h_c ":[5]

Le coefficient du film est déterminé en fonction du régime d'écoulement et des propriétés thermiques de l'huile aux conditions de service.

2-1) Calcul du régime d'écoulement du Therminol 66 dans la calandre " Re " :

Le régime d'écoulement est déterminé d'après la formule suivante :

$$Re = \frac{\rho U . d_e}{\mu} = \frac{G . d_e}{\mu} \dots\dots\dots(20)$$

Avec :

- d_e : diamètre équivalent des tubes (m).
- $G = M / a_c$ vitesse massique de la charge dans la calandre (kg/sm²).
- a_c : Section du passage de l'huile chaude dans la calandre (m²).

Pour le pas triangulaire simple, le calcul du diamètre équivalent et la section de passage se fait d'après les formules suivantes :

$$d_e = \frac{3,464 . P^2}{\pi . d_0} - d_0 \quad [m] \dots\dots\dots(21)$$

$$a_c = \frac{D_c}{P} (P - d_0) B \quad [m^2] \dots\dots\dots(22)$$

L'application de la formule n°21 donne $d_e = 18,45 . 10^{-3} m$
et la formule n°22 donne $a_c = 0,049 m^2$

D'où : $G = (108 . 10^3 / 0,049) = 2,2 . 10^6 \text{ kg} / \text{hm}^2 \Rightarrow G = 612,24 \text{ kg} / \text{sm}^2$.

-La vitesse linéaire de circulation de la charge dans la calandre est : $U = G / \rho$
 $\Rightarrow U = 0,73 \text{ m/s}$.

Donc : $Re = (612,24 . 18,45 . 10^{-3}) / 0,52 . 10^{-3} \Rightarrow Re = 2,172 . 10^4$.

$Re > 10^4$: Le régime d'écoulement du Therminol 66 dans la calandre est un régime turbulent, le calcul du coefficient du film est basé sur la formule suivante :

$$Nu = \frac{h_c . d_e}{\lambda} = 0,33 . Re^{0,6} . Pr^{1/3} . \Phi_c \dots\dots\dots(23)$$

Avec:

- Pr est calculé d'après la formule n°03, $Pr = (0,58 . 0,52 . 10^{-3} . 3600) / 0,085$

D'où $Pr = 12,77$.

- $\phi_c = (\mu_t / \mu_c)^{0,14}$: Coefficient correctif de la viscosité de l'huile chaude.

- μ_t : Viscosité de l'huile chaude à la température du tube : T_t .

h_c : coefficient de film de l'huile [kcal/h.m².°C]

L'application de la formule (23) donne :

$$\frac{h_c \cdot 18,45 \cdot 10^{-3}}{0,085} = 0,33 \cdot (2,172 \cdot 10^4)^{0,6} \cdot (12,77)^{1/3} \cdot \phi_c \Rightarrow (h_c / \phi_c) = 1421,61 \text{ kcal / hm}^2\text{°C}.$$

2-2) calcul de la température de tube “ T_t ” :

Ce calcul se fait par l'application de la formule suivante :

$$T_t = T - \frac{\left(\frac{h_t}{\phi_t} \right)}{\left(\frac{h_t}{\phi_t} \right) + \left(\frac{h_c}{\phi_c} \right)} \cdot (T - t) \quad [^{\circ}\text{C}] \quad \dots\dots\dots(24)$$

T : température moyenne de l'huile chaude (coté calandre) , $T=262,5$ °C.

t : température moyenne du gaz de régénération (coté tube) , $t=154$ °C

Alors pour avoir la température des tubes il suffit que de trouver le terme (h_t / ϕ_t) côté tube.

- La vitesse massique du gaz dans les tubes est : $g = m'/a_t$.
- Le diamètre intérieur des tubes $d_i = 1,478$ cm.
- La section de passage est donnée par la formule n° (05), l'application de cette dernière donne : $a_t = 0,061 \text{ m}^2$.

D'où $g = (28400 / 0,061) = 4,65 \cdot 10^5 \text{ kg / hm}^2 \Rightarrow g = 129,32 \text{ kg / sm}^2$.

- Le régime d'écoulement d'après la formule n° (02) est :

$$Re = (129,32 \cdot 1,478 \cdot 10^{-3}) / 0,0159 \cdot 10^{-3} \Rightarrow Re = 1,2 \cdot 10^5$$

$Re > 10^4$ d'où le régime d'écoulement de gaz de régénération le long des tubes est un régime turbulent, le calcul du coefficient du film interne est basé sur la formule n°(06).

La formule (n° 03) donne : $Pr = (0,681 \cdot 0,0159 \cdot 10^{-3} \cdot 3600) / 0,049 \Rightarrow Pr = 0,795$.

L'équation (06) donne dans ce cas : $(h_t / \phi_t) = 817,30 \text{ kcal / hm}^2\text{°C}.$

La formule n° 24 donne :

$$T_t = 262,5 - \frac{817,3}{817,3 + 1421,61} (262,5 - 154) \Rightarrow T_t = 222,89 \text{ °C}.$$

- Le coefficient de correction de la viscosité du Therminol 66 à la température de la peau des tubes sera donc : $\phi_c = (\mu_{262,5^\circ\text{C}} / \mu_{222,89^\circ\text{C}})^{0,14}$.

Pour la température $T = 222,89^\circ\text{C} \Rightarrow \mu_{222,89^\circ\text{C}} = 0,702.10^{-3} \text{ Pa.s}$

Alors $\phi_c = 0,95$.

Le coefficient du film de l'huile diathermique sera donc : $h_c = 1421,61 \cdot 0,95$ d'où
 $h_c = 1363,12 \text{ kcal} / \text{hm}^2\text{°C}$.

3- calcul du coefficient d'échange globale " U_s " : [5]

Le calcul est basé sur la formule suivante :

$$\frac{1}{U_s} = \frac{1}{h_c} + \frac{1}{h_t} \left(\frac{d_0}{d_i} \right) + R_{sc} + R_{st} \left(\frac{d_0}{d_i} \right) \quad [\text{h m}^2\text{°C/kcal}]. \quad \dots\dots\dots (25)$$

Avec:

$$h_c = 1363,12 \text{ kcal/h.m}^2\text{°C}.$$

$$h_t = 817,3 \text{ kcal/h.m}^2\text{°C}.$$

$$R_{sc} = R_{st} = 2.10^{-4} \text{ h.m}^2\text{°C/ kcal}.$$

$$d_0/d_i = 1,285$$

L'application de la formule n° (25) donne:

$$\frac{1}{U_s} = 0,0027 \quad [\text{h.m}^2\text{°C/kcal}] \Rightarrow U_s = \mathbf{361,94 \text{ kcal/h .m}^2\text{°C}}$$

-la surface d'échange est calculée d'après la formule suivante :

$$A_{ech} = Q / (U_s \cdot \Delta T_{lm}) \quad (\text{m}^2)$$

Avec :

$$Q = 4,7 \cdot 10^6 \text{ kcal/h}$$

$$U_s = 361,94 \text{ kcal/h m}^2\text{°C}$$

$$\Delta T_{LM} = \frac{\Delta T_2 - \Delta T_1}{\ln \left(\frac{\Delta T_2}{\Delta T_1} \right)}$$

$$\Delta T_2 = T_e - t_s \Rightarrow \Delta T_2 = 25^\circ\text{C} \quad .$$

$$\Delta T_1 = T_s - t_e \Rightarrow \Delta T_1 = 191,5^\circ\text{C}$$

$$\Rightarrow \Delta T_{LM} = \mathbf{81,77^\circ\text{C}}$$

D'où on trouve que **$A_{ech} = 158,8 \text{ m}^2$**

4- Calcul de la température de paroi :

Le calcul est basé sur la formule suivant :

$$\frac{T_e - T_p}{T_s - T_p} = \exp\left(\frac{T_e - T_s}{\Delta TLM}\right) = \exp\left(\frac{300 - 225}{81,77}\right) = 2,5 \Rightarrow T_p = 175^\circ\text{C}.$$

5- Calcul des pertes de charge coté calandre : [5]

Les pertes de charge dues au frottement d'après la formule suivantes:

$$\Delta P = \frac{f_c n_c G^e (N_c + 1) D_c}{\rho \cdot d_c \Phi_c} \quad [\text{Pas}] \dots\dots\dots (26)$$

f_c : Facteur de friction, déterminé graphiquement en fonction de Re d'après l'annexe n°04

$$Re = 2,172 \cdot 10^4 \Rightarrow f_c = 0,14.$$

$$(N_c + 1) = (L/B) = 25,71.$$

d'où : $\Delta P = 5,13 \cdot 10^4 \text{ Pas} \Rightarrow \Delta P = 0,513 \text{ bar} < 0,7 \text{ bar}$ (pertes de charge admissible).

❖ Cas d'utilisation du Therminol SP :

- Les propriétés thermiques du Therminol SP sont déterminées à la température moyenne de service : $T_{moy} = 262,5^\circ\text{C}$.

- Chaleur échangée : $Q = 4,7 \cdot 10^6 \text{ kcal/h}$.
- Température entrée : $T_e = 300^\circ\text{C}$.
- Température de sortie : $T_s = 225^\circ\text{C}$.
- Masse volumique moyenne : $\rho = 702 \text{ kg/m}^3$.
- Conductivité thermique : $\lambda = 0,086 \text{ kcal/hm}^\circ\text{C}$.
- Chaleur spécifique moyenne : $C_p = 0,661 \text{ kcal/kg}^\circ\text{C}$.
- Viscosité moyenne : $\mu = 0,44 \cdot 10^{-3} \text{ Pa.s}$.
- Résistance d'encrassement $R_s = 2 \cdot 10^{-4} \text{ (h.m}^2 \cdot ^\circ\text{C /kcal)}$.

1- Détermination du débit du Therminol SP nécessaire pour l'échange thermique dans le 10/E-10 :

$$\text{L'application de l'équation (01) donne : } m = \frac{Q}{C_p \cdot \Delta T} = \frac{4,7 \cdot 10^6}{0,661(300 - 225)} = 94,8 \cdot 10^3 \text{ kg/h}.$$

Alors le débit du Therminol SP nécessaire pour effectuer l'échange thermique est : $m = 94,8 \cdot 10^3 \text{ kg/h}$, ou bien un débit volumique de $v = 135,05 \text{ m}^3/\text{h}$.

2- Calcul le coefficient de film à l'intérieur des tubes de " h_i ":

2-1) Détermination du régime d'écoulement " Re " :

Le régime d'écoulement du Therminol SP est déterminé d'après la formule n° 20.

- G : la vitesse massique de circulation de la charge dans la calandre :

$$G = m / a_c = 94,8 \cdot 10^3 / 0,049 \Rightarrow G = 1,93 \cdot 10^6 \text{ kg} / \text{hm}^2, \text{ d'où } G = 537,41 \text{ kg} / \text{sm}^2.$$

- La vitesse linéaire est : $U = (G / \rho) = 537,41 / 702 \Rightarrow U = 0,76 \text{ m/s}$.

$$\text{La formule (20) donne : } Re = (537,41 \cdot 18,45 \cdot 10^{-3}) / 0,44 \cdot 10^{-3} \Rightarrow Re = 2,25 \cdot 10^4.$$

$Re > 10^4$: Le régime d'écoulement du Therminol SP dans la calandre est un régime turbulent, le calcul du coefficient du film est basé sur la formule n°23.

$$Pr \text{ est calculé d'après la formule n°03, } Pr = (0,661 \cdot 0,44 \cdot 10^{-3} \cdot 3600) / 0,086$$

$$\text{D'où } Pr = 12,17.$$

2-2) calcul de la température de tube " T_t " :

Ce calcul se fait par l'application de la formule n°24.

Avec :

-(h_c / ϕ_c) est calculée d'après la formule (23) :

$$\frac{h_0 \cdot 18,45 \cdot 10^{-3}}{0,086} = 0,33 \cdot (2,25 \cdot 10^4)^{0,6} \cdot (12,17)^{1/3} \cdot \phi_c \Rightarrow (h_c / \phi_c) = 1445,73 \text{ kcal} / \text{hm}^2 \text{°C}.$$

$$-(h_t / \phi_t) = 817,3 \text{ kcal} / \text{hm}^2 \text{°C}.$$

$$-T = 262,5 \text{ °C}.$$

$$-t = 154 \text{ °C}.$$

L'application de la formule (24) donne $T_t = 223,31 \text{ °C}$.

- Le coefficient de correction de la viscosité du Therminol SP à la température de la peau des tubes sera donc : $\phi_c = (\mu_{262,5 \text{ °C}} / \mu_{223,31 \text{ °C}})^{0,14}$.

$$\text{Pour la température } T = 223,31 \text{ °C} \Rightarrow \mu_{223,31 \text{ °C}} = 0,61 \cdot 10^{-3} \text{ Pa.s}$$

$$\text{Alors } \phi_c = 0,955.$$

Le coefficient du film de l'huile diathermique sera donc : $h_c = 1445,73 \cdot 0,955$ d'où $h_c = 1380,67 \text{ kcal} / \text{hm}^2 \text{°C}$.

3- calcul du coefficient d'échange globale " U_s " :

Le calcul est basé sur la formule n°25 :

Avec:

$$h_c = 1380,67 \text{ kcal/h.m}^2\text{.}^\circ\text{C.}$$

$$h_t = 817,3 \text{ kcal/h.m}^2\text{.}^\circ\text{C.}$$

$$R_{sc} = R_{st} = 2.10^{-4} \text{ h.m}^2\text{.}^\circ\text{C/ kcal.}$$

$$d_o/d_i = 1,285$$

L'application de la formule n° (25) donne:

$$\frac{1}{U_s} = 0,00275 \text{ [h.m}^2\text{.}^\circ\text{C/kcal]} \Rightarrow U_s = 363,16 \text{ kcal/h .m}^2\text{.}^\circ\text{C}$$

-la surface d'échange est calculée d'après la formule suivante :

$$A_{ech} = Q / (U_s \cdot \Delta T_{im}) \quad (\text{m}^2)$$

Avec :

$$Q = 4,7 \cdot 10^6 \text{ kcal/h}$$

$$U_s = 363,16 \text{ kcal/h m}^2\text{.}^\circ\text{C}$$

$$\Delta TLM = 81,77^\circ\text{C}$$

$$\text{D'où on trouve que } A_{ech} = 158,27 \text{ m}^2$$

4) Calcul des pertes de charge coté calandre :

Les pertes de charge dues au frottement d'après la formule n°26 :

Avec :

f_c : Facteur de friction ,déterminé graphiquement en fonction de Re d'après l'annexe n°04

$$Re = 2,25.10^4 \Rightarrow f_c = 0,137.$$

$$\text{D'où : } \Delta P = 4,6. 10^4 \text{ Pas} \Rightarrow \Delta P = 0,46 \text{ bar} < 0,7 \text{ bar (pertes de charge admissible)}$$

❖ Interpolation de calcul :

Les résultats de calcul sont indiqués dans la tableau ci-dessous :

Tableau n° 32:

paramètres	Cas actuel Therminol 66	Cas d'utilisation du Therminol SP
Débit de la charge M (kg/h)	$108 \cdot 10^3$	$94,8 \cdot 10^3$
Chaleur échangée Q (kcal /h)	$4,7 \cdot 10^6$	$4,7 \cdot 10^6$
Diamètre équivalent d_e (m)	$18,45 \cdot 10^{-3}$	$18,45 \cdot 10^{-3}$
Section de passage a_c (m ²)	0,049	0,049
Vitesse massique d'écoulement de la charge G (kg/s.m ²)	612,24	537,41
Vitesse de circulation u (m /s)	0,73	0,76
Nombre de Reynolds Re	$2,172 \cdot 10^4$	$2,25 \cdot 10^4$
Nombre de Prandlt Pr	12,77	12,17
$(kcal/ h.m^2\text{°C}) \left(\frac{h_c}{\phi_c} \right)$	1421,61	1445,73
Température des tubes T_t (°C)	222,89	223,31
Coefficient correctif de la viscosité ϕ_t	0,95	0,955
Coefficient interne de l'huile h_c (kcal/h.m ² °C)	1363,12	1380,67
Coefficient global de transfert U_s (Kcal/h.m ² °C)	361,94	363,16
ΔTLM (°C)	81,77	81,77
Surface d'échange nécessaire A_{ech} (m ²)	158,8	158,27
Température de paroi T_p (°C)	175	175
Facteur de friction f_t	0,14	0,137

Pertes de charge ΔP (bar)	0,513	0,46
-----------------------------------	-------	------

Ces résultats montrent que la surface d'échange des deux huiles est presque la même et suffisante pour effectuer le transfert thermique désiré, avec des pertes de charge acceptable dans les deux cas (perte de charge admissible est de 0,7 bar).

VI- Calcul thermique du réchauffeur régénérateur du déshydrateur liquide''10/E-11'' :

Comme dans le cas de l'échangeur 10/E-10, le réchauffeur 10/E-11 à pour rôle d'assurer le chauffage du gaz de régénération de déshydrateur liquide à tamis moléculaire (10 / V-03 A/B) pendant la phase de réchauffage à une température de 275 °C.

Le réchauffage se fait par l'utilisation de l'huile chaude provenant de l'unité 141 pour une rampe de chauffage de 05,8 heures pour chacun des déshydrateurs.

Caractéristiques du réchauffeur 10/ E-11:

Type : Faisceau et Calandre.

Diamètre de la calandre : $D_c = 43,816.10^{-2}m$.

Espace entre chicane : $B = 0,2m$.

Diamètre intérieur $d_i = 0,01478 m$.

Diamètre extérieur des tubes : $d_o = 0,019m$.

Nombre des tubes: $N_t = 204$ tubes.

Pas des tubes : $P = 0,0254 m$,de type triangulaire simple.

Longueur des tubes : $L = 9m$.

Nombre de passe côté calandre : $n_c = 1$.

Nombre de passe côté tube : $n_t = 1$.

Pertes de charge tolérée : $\Delta P = 0,7 bar$.

La surface d'échange installé $A_{ins} = 109,55m^2$.

Situation actuelle : Therminol 66 comme fluide caloporteur.

Tableau n°33 :

Données process de la charge	Coté tube (gaz de régénération)	Coté calandre (Therminol 66)
Température entrée T_e (°C)	33,5	300
Température sortie T_s (°C)	275	210
Débit massique M (kg/h)	12190	$43,48.10^3$

Propriétés thermiques moyennes aux conditions de service (T_{moy}) :

Tableau n° 34 :

Masse volumique ρ (kg/m ³)	71,281	844,1
Chaleur spécifique C_p (kcal/kg.°C)	0,681	0,573
Conductivité thermique λ (kcal/h.m°C)	0,049	0,085
Viscosité dynamique μ (Pa.s)	$0,0159.10^{-3}$	$0,55.10^{-3}$
Résistance d'encrassement R_s (h.m ² .°C /kcal)	2.10^{-4}	2.10^{-4}
Densité d	0,7	0,844

Cas d'utilisation du Therminol SP :

Les propriétés thermiques du Therminol SP sont déterminées à la température moyenne de service : $T_{moy} = 255^\circ\text{C}$.

Température entrée : $T_e = 300^\circ\text{C}$.

Température de sortie : $T_s = 225^\circ\text{C}$.

Masse volumique moyenne : $\rho = 707,5 \text{ kg/m}^3$.

Conductivité thermique : $\lambda = 0,087 \text{ kcal/hm}^\circ\text{C}$.

Chaleur spécifique moyenne : $C_p = 0,654 \text{ kcal/kg }^\circ\text{C}$.

Viscosité moyenne : $\mu = 0,47.10^{-3} \text{ Pa.s}$.

Résistance d'encrassement $R_s = 2.10^{-4} \text{ (h.m}^2.^\circ\text{C /kcal)}$.

Le calcul du réchauffeur 10/E-11, est semblable à celle de réchauffeur 10/E-10, pour cela on donne directement les résultats de calcul qui sont résumés dans le tableau n°34.

Interpolation de calcul :

Les résultats de calcul sont indiqués dans le tableau ci -dessous :

Tableau n°35:

Paramètres	Cas actuel Therminol 66	Cas d'utilisation du Therminol SP
Débit de la charge M (kg/h)	$43,48.10^3$	38.10^3
Chaleur échangée Q (kcal /h)	$2,24.10^6$	$2,24.10^6$
Diamètre équivalent d_e (m)	$18,45.10^{-3}$	$18,45.10^{-3}$
Section de passage a_c (m ²)	0,022	0,022
Vitesse massique d'écoulement de la charge G (kg/s.m ²)	549	479,79
Vitesse de circulation u (m /s)	0,65	0,678
Nombre de Reynolds Re	$1,84.10^4$	$1,88.10^4$
Nombre de Prandlt Pr	13,34	12,72
$(kcal/ h.m^2.°C) \left(\frac{h_c}{\phi_c} \right)$	1305,8	1332,58
Température des tubes T_t (°C)	221,48	221,9
Coefficient correctif de la viscosité ϕ_c	0,964	0,962
Coefficient interne de l'huile h_c (kcal/h.m ² °C)	1258,79	1281,94
Coefficient global de transfert U_s (Kcal/h.m ² °C)	309,37	310,75
ΔTLM (°C)	77,51	77,51
Surface d'échange nécessaire A_{ech} (m ²)	93,41	93
Température de paroi T_p (°C)	169	169
Facteur de friction f_t	0,145	0,145
Pertes de charge ΔP (bar)	0,573	0,524

La surface d'échange installée du 10/E -11 peut assurer l'échange thermique imposé

Pour les deux cas d'utilisation (Therminol66 et Therminol SP), les pertes de charge trouvée est acceptable (inférieur à celles toléré dans les deux cas).

VII- Calcul thermique du réchauffeur de GPL ''10 / E-15''

Le réchauffeur de GPL 10 /E-15 est dimensionné dont le but de pouvoir évaporer le GPL produit à une température de 190 °C pour le réinjecter dans le gisement, et ce la dans le cas ou des problèmes au niveau des sphères de stockage ou au niveau du linge d'expédition de produit vers les stations de compression auras lieu.

Caractéristique du réchauffeur du GPL 10 / E-15 :

- Type : faisceau et calandre.
- Calandre : huile chaude.
- Tubes : GPL.
- Diamètre de la calandre : $D_c = 43,816.10^{-2}m$.
- Espace entre chicane : $B = 0,23 m.$.
- Diamètre intérieur des tubes $d_i=0,01478m$.
- Diamètre extérieur des tubes : $d_o= 0,019m$.
- Nombre des tubes : $N_t = 66$ tubes.
- Longueur des tubes : $L = 9 m$.
- Pas des tubes : $P =0,0254 m$,de type triangulaire simple.
- Nombre de passe côté calandre : $n_c = 1$
- Nombre de passe côté tube : $n_t = 2$.
- Surface installée $A_{ins}= 33,51m^2$.
- Pertes de charge admises : $\Delta P = 0,5 bar$.

❖ **Situation actuelle : Therminol 66 comme fluide caloporteur.**

Tableau n°36:

Données process de la charge	Coté tube (GPL)	Coté calandre (Therminol 66)
Température entrée T_e (°C)	72	300
Température sortie T_s (°C)	150	190
Débit massique M (kg/h)	33900	$37,51.10^3$

Propriétés thermiques moyennes aux conditions de service (T_{moy}) :

Tableau n° 37 :

Masse volumique ρ (kg/m ³)	383,871	851,7
Chaleur spécifique C_p (kcal/kg.°C)	0,825	0,564
Conductivité thermique λ (kcal/h.m°C)	0,0861	0,087
Viscosité dynamique μ (Pa.s)	$0,0613.10^{-3}$	$0,59.10^{-3}$
Résistance d'encrassement R_s (h.m ² .°C /kcal)	10^{-5}	2.10^{-4}
Densité d	0,3838	0,851

❖ **Cas d'utilisation du Therminol SP :**

Les propriétés thermiques du Therminol SP sont déterminées à la température moyenne de service : $T_{moy} = 245^\circ\text{C}$.

- Température entrée : $T_e = 300^\circ\text{C}$.
- Température de sortie : $T_s = 190^\circ\text{C}$.
- Masse volumique moyenne : $\rho = 715\text{kg/m}^3$.
- Conductivité thermique : $\lambda = 0,088\text{kcal/hm}^\circ\text{C}$.
- Chaleur spécifique moyenne : $C_p = 0,646\text{ kcal/kg }^\circ\text{C}$.
- Viscosité moyenne : $\mu = 0,51.10^{-3}\text{ Pa.s}$.
- Résistance d'encrassement $R_s = 2.10^{-4}$ (h.m². °C /kcal).

Le calcul du réchauffeur 10/E-15 est semblable à celle du réchauffeur 10/E-10 et 10/E-11 pour cela on donne directement les résultats de calcul qui sont résumés dans le tableau n°38

❖ **Interpolation de calcul :**

Les résultats de calcul sont indiqués dans le tableau ci -dessous :

Paramètres	Cas actuel Therminol 66	Cas d'utilisation du Therminol SP
Débit de la charge M (kg/h)	$37,51.10^3$	$32,74.10^3$

Tableau n° 38 :

Chaleur échangée Q (kcal /h)	$2,327.10^6$	$2,327.10^6$
Diamètre équivalent d_e (m)	$18,45.10^{-3}$	$18,45.10^{-3}$
Section de passage a_c (m^2)	0,025	0,025
Vitesse massique d'écoulement de la charge G (kg/s. m^2)	416,77	363,77
Vitesse de circulation u (m /s)	0,489	0,508
Nombre de Reynolds Re	$1,3.10^4$	$1,31.10^4$
Nombre de Prandlt Pr	13,77	13,47
$(kcal/ h.m^2.^{\circ}C) \left(\frac{h_c}{\phi_c} \right)$	1096,6	1106,16
Température des tubes T_t ($^{\circ}C$)	134,2	134,38
Coefficient correctif de la viscosité ϕ_c	0,847	0,851
Coefficient interne de l'huile h_c (kcal/h. $m^2.^{\circ}C$)	928,82	941,34
Coefficient global de transfert U_s (Kcal/h. $m^2.^{\circ}C$)	651,46	657,6
ΔTLM ($^{\circ}C$)	133,36	133,36
Surface d'échange nécessaire A_{ech} (m^2)	26,784	26,53
Température de paroi T_p ($^{\circ}C$)	104,06	104,06
Facteur de friction f_t	0,147	0,147
Pertes de charge ΔP (bar)	0,329	0,297

Dans les deux cas on trouve que la surface d'échange installée est suffisante pour effectuer l'échange de chaleur imposé.

Les deux pertes de charge calculées sont acceptable (<0,5 bar).

VIII- Calcul thermique de réchauffeur de fuel gaz "120 / E-01"

Le rôle du réchauffeur 120 / E-01 est de réchauffer le fuel gaz provenant des ballons de séparation de la basse pression, pour l'alimentation du four de l'unité système huile chaude (unité 141), les turbines des unités de compression et de réinjection du gaz sec (unité 50 /51 et 60/61) et la turbine au niveau de centrale électrique (unité 240).

Le fuel gaz est chauffé à une température de 52 $^{\circ}C$ par l'utilisation de l'huile diathermique chaude de l'unité 141.

Caractéristique du réchauffeur du fuel gaz 120 / E-01 :

- Type : Faisceau et Calandre.

- Diamètre de la calandre : $D_c = 0,254$ m.
- Espace entre chicane : $B = 0,105$ m.
- Nombre des tubes: $N_t = 42$ tubes.
- Diamètre interne des tubes $d_i = 0,02118$ m
- Diamètre extérieur des tubes : $d_o = 0,0254$ m.
- Pas des tubes : $P = 3,175 \cdot 10^{-2}$ m, de type triangulaire simple.
- Longueur des tubes : $L = 2,54$ m.
- Nombre de passe côté calandre : $n_c = 2$.
- Nombre de passe côté tube : $n_t = 2$.
- Pertes de charge admises : $\Delta P = 0,5$ bar.
- Surface d'échange installé $A_{ins} = 8,51$ m².

❖ **Situation actuelle : Therminol 66 comme fluide caloporteur**

Tableau n°39 :

Données process de la charge	Coté tube (GPL)	Coté calandre (Therminol 66)
Température entrée T_e (°C)	26	300
Température sortie T_s (°C)	52	205
Débit massique M (kg/h)	37500	9234

Propriétés thermiques moyennes aux conditions de service (T_{moy}) :

Tableau n° 40 :

Masse volumique ρ (kg/m ³)	21,727	846
Chaleur spécifique C_p (kcal/kg.°C)	0,512	0,57
Conductivité thermique λ (kcal/h.m°C)	0,0016	0,086
Viscosité dynamique μ (Pa.s)	$1,2 \cdot 10^{-5}$	$0,56 \cdot 10^{-3}$
Résistance d'encrassement R_s (h.m ² .°C /kcal)	$4 \cdot 10^{-5}$	$2 \cdot 10^{-4}$
Densité d	0,672	0,849

❖ **Cas d'utilisation du Therminol SP :**

Les propriétés thermiques du Therminol SP sont déterminées à la température moyenne de service : $T_{moy} = 252,5^\circ\text{C}$.

- Température entrée : $T_e = 300\text{ }^{\circ}\text{C}$.
- Température de sortie : $T_s = 205\text{ }^{\circ}\text{C}$.
- Masse volumique moyenne : $\rho = 709,25\text{ kg/m}^3$.
- Conductivité thermique : $\lambda = 0,087\text{ kcal/hm}^{\circ}\text{C}$.
- Chaleur spécifique moyenne : $C_p = 0,652\text{ kcal/kg }^{\circ}\text{C}$.
- Viscosité moyenne : $\mu = 0,48 \cdot 10^{-3}\text{ Pa.s}$.
- Résistance d'encrassement $R_s = 2 \cdot 10^{-4}\text{ (h.m}^2 \cdot ^{\circ}\text{C /kcal)}$.

Le calcul du réchauffeur 120/E-01 est semblable à celle de réchauffeur 10/E-10 ,10/E-11 et 10/E-15 pour cela on donne directement les résultats de calcul qui sont résumés dans le tableau n°41.

❖ **Interpolation de calcul :**

Les résultats de calcul sont indiqués dans le tableau ci -dessous :

Tableau n°41 :

Paramètres	Cas actuel Therminol 66	Cas d'utilisation du Therminol SP
Débit de la charge M (kg/h)	9234	8072,33
Chaleur échangée Q (kcal /h)	5.10^5	5.10^5
Diamètre équivalent d_e (m)	$18,38.10^{-3}$	$18,38.10^{-3}$
Section de passage a_c (m ²)	$5,33.10^{-3}$	$5,33.10^{-3}$
Vitesse massique d'écoulement de la charge G (kg/s.m ²)	481,24	420,69
Vitesse de circulation u (m /s)	0,569	0,593
Nombre de Reynolds Re	$1,58.10^4$	$1,61.10^4$
Nombre de Prandlt Pr	13,36	12,95

$\left(\frac{h_c}{\phi_c}\right)$ (kcal/ h.m ² °C)	1210,96	1226,14
Température des tubes T_t (°C)	186,3	186,88
Coefficient correctif de la viscosité ϕ_c	0,923	0,923
Coefficient interne de l'huile h_c (kcal/h.m ² °C)	1117,71	1132,24
Coefficient global de transfert U_s (Kcal/h.m ² °C)	298,68	299,7
ΔTLM (°C)	211,62	211,62
Surface d'échange nécessaire A_{ech} (m ²)	7,91	7,88
Température de paroi T_p (°C)	37,11	37,11
Facteur de friction f_t	0,14	0,14
Pertes de charge ΔP (bar)	0,277	0,253

Pour les deux huiles, le calcul donne une surface d'échange suffisante pour effectuer le

Transfert thermique désiré.

Les pertes de charge calculées sont acceptables (< 0,5bar).

IX- Calcul de vérification de la pompe de circulation de l'huile chaude

''141/P-01'' dans les deux cas de fonctionnement

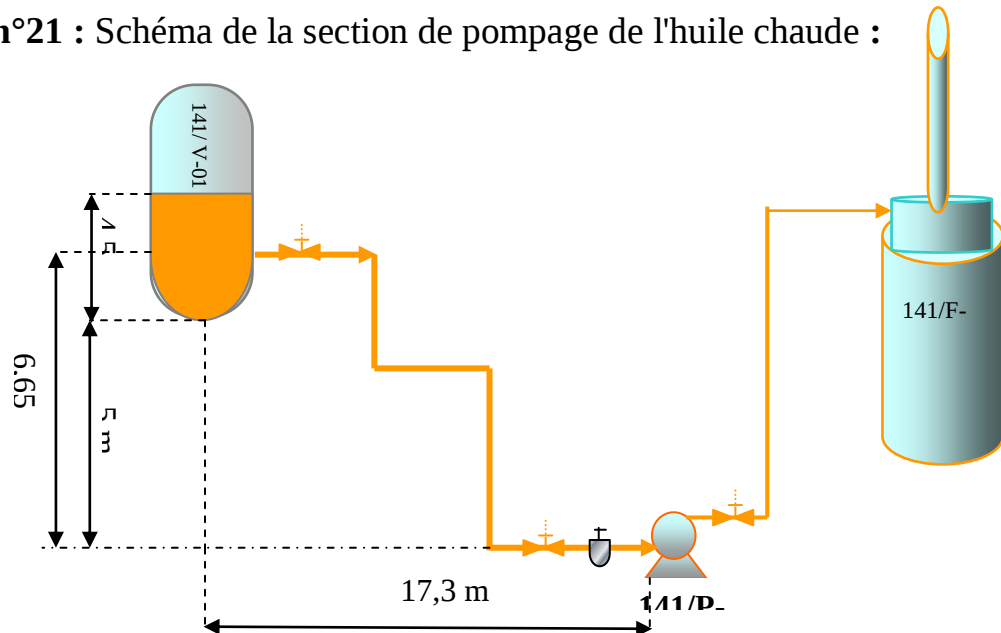
La pompe 141 / P-01 c'est une pompe centrifuge horizontale à un étage à pour rôle d'assurer l'alimentation régulière du four 141/F-01 de l'huile caloporteuse et de la véhiculer à travers les circuits des divers équipements des unités de traitement (10 / 20) et l'unité de distribution de fuel gaz (unité 120). La pompe 141 / P-01 est accouplée par un moteur électrique qui assure une vitesse de rotation de 2950 tours / min.

Caractéristiques de la pompe 141/ P-01 :

- Hauteur manométrique totale : $Hmt = 98,6$ m.
- NPSHr = 4,3 m. (Net Positive Suction Head Requis).
- Rendement de la pompe : $\eta = 77,5$ %.
- Diamètre du linge d'aspiration : $D = 40,64 \cdot 10^{-2}$ m.

- Diamètre du linge de refoulement : $D = 25,4.10^{-2}m$.
- Pression d'aspiration minimale : 3,3 bar.
- Pression de refoulement : 11,7 bar.
- Nombre de tours : $N = 2950$ tours / min.

Figure n°21 : Schéma de la section de pompage de l'huile chaude :



Les courbes caractéristiques $Q_v=f$ (Hmt, rendement et la puissance) sont indiquées dans la **figure n° 22**.

❖ **Situation actuelle : Therminol 66 comme fluide caloporteur.**

➤ **Propriétés process de Therminol 66 :**

- Débit volumique d'huile à pomper : $Q_v = 355 \text{ m}^3 / \text{h}$.
- Température d'aspiration : $T_{asp} = 210 \text{ }^\circ\text{C}$.
- La masse volumique d'huile : $\rho = 877,8 \text{ kg/m}^3$.
- Viscosité cinématique de l'huile :
 - à $25 \text{ }^\circ\text{C}$: $\nu = 88,98 \text{ Cst}$
 - à $210 \text{ }^\circ\text{C}$: $\nu = 0,89 \text{ Cst}$.
- Tension de vapeur de l'huile : $TVR = 0,04 \text{ bar}$.
- Viscosité dynamique : $\eta = 0,78.10^{-3} \text{ Pa.s}$.

1-Calcul de la puissance absorbée et fournie par la pompe :

1-1) La puissance fournie à l'huile :

Par définition la puissance est donnée par la relation suivante :

$$P = \rho \cdot g \cdot Q_v \cdot H_{mt} \quad [w] \dots\dots\dots (27).$$

Avec :

g : l'accélération de gravité, $g=9,81 \text{ m/s}^2$

H_{mt} : hauteur manométrique totale, $H_{mt}=98,6\text{m}$.

Q_v = débit volumique d'huile à pomper, $Q_v= 355 \text{ m}^3/\text{h}$.

ρ : La masse volumique d'huile $\rho= 877,8 \text{ kg/m}^3$.

L'application de la formule donne : $P=877,8 \cdot 9,81 \cdot (355/3600) \cdot 98,6=83,72 \cdot 10^3 \text{ w}$

Donc la puissance fournie à l'huile véhiculée est : **$P=83,72 \text{ kw}$** .

1-2) la puissance absorbée :

La relation ci-dessous donne le rendement de la pompe en fonction de la puissance fournie par la pompe et la puissance absorbée :

$$\eta = \frac{\text{Puissance fournie}}{\text{Puissance absorbée}} = \frac{P}{P_a} = \frac{\rho \cdot g \cdot H_{mt} \cdot Q_v}{P_a} \dots\dots\dots (28).$$

L'application de cette formule donne $P_a = \frac{P}{\eta} = \frac{83,72}{0,775} = 108,02 \text{ kw}$

La puissance absorbée sera donc : **$P_a=108,02 \text{ kw}$** .

2-Vérification de l'état de marche de la pompe :

Il faut vérifier que la pompe travail hors domaine de cavitation, alors on doit vérifier la formule **$NPSH_{disp} > NPSH_r$** , plus que l'écart est importante plus le fonctionnement de la pompe est l'oins de phénomène de cavitation.

- Le $NPSH_r$ (hauteur d'aspiration nécessaire) est définie comme hauteur de charge net absolu demandé à l'aspiration, ou bien la pression indispensable à la bride d'aspiration ,il est donné par le constructeur en mètre de liquide pompé, pour notre cas la $NPSH_r = 4,3\text{m}$.

- $NPSH_{disp}$, elle est liée à l'installation, c'est la hauteur de liquide (fluide caloporteur) effectivement présent au-dessus de l'aspiration de la pompe, donc il faut vérifier que $NPSH_{disp} > 4,3 \text{ m}$.

○ Calcul le $NPSH_{disp}$:

$NPSH_{disp}$ est calculé d'après la formule suivante :

$$NPSH_{disp} = \frac{1}{\rho \cdot g} (P - TVR) - (H + \Delta H) \quad [m] \dots\dots\dots (29).$$

Avec :

- H : Hauteur géométrique d'aspiration de la pompe, $H = 9,5$ m.
- ΔH : Pertes de charge entre le ballon (V-01) et l'aspiration de la pompe (m).
- P : La pression au dessus de l'huile, $P = 2,5.10^5$ Pa.

○ **Calcul ΔH :**

Les pertes de charge $\Delta H = \Delta H_{Frot} + \Delta H_{Sing}$

Avec :

- ΔH_{Frot} : Pertes de charge par frottement, $\Delta H_{Frot} = \lambda \cdot \frac{L}{D} \cdot \frac{U^2}{2g}$ [m].....

(30).

- ΔH_{Sing} : Pertes de charge par singulière, $\Delta H_{Sing} = \sum \xi_i \cdot \frac{U^2}{2g}$ [m]

(31).

Avec :

- U : La vitesse linéaire de circulation de l'huile (m / s).
- λ : Coefficient de perte de charge régulière, $\lambda = f(Re, \text{rugosité relative})$.
- ξ : Coefficient de perte de charge singulière (pour les coudes, vannes et clapet).

La formule devient alors : $\Delta H = \frac{U^2}{2g} \left(\lambda \cdot \frac{L}{D} + \sum \xi_i \right)$ [m](32).

- Calcul la vitesse de circulation de l'huile "U" :

$$U = \frac{Q_v}{a}$$

a :section de passage de Therminol 66 (m^2).

$$a = \frac{\pi \cdot D_a^2}{4} = \frac{3,14 \cdot (0,4064)^2}{4}$$

$$\Rightarrow a = 0,129 \text{ m}^2.$$

$$\text{D'où } U = \frac{355}{0,129} = 2,75.10^3 \text{ m/h.} \Rightarrow U = 0,764 \text{ m/s.}$$

- Calcul λ :

D'après le diagramme de COLEBROOK (voir annexe n°05), la valeur de λ est déterminée en fonction de Re et la rugosité de la conduite.

- **Calcul de Re :**

$$Re = (877,8.0,764.0,4064) / 0,78.10^{-3}$$

$$\text{D'où } Re = 3,49.10^5.$$

La rugosité de la conduite est $\varepsilon = 0,00015$, d'où la rugosité relative $\varepsilon/D = 0,00036$, le diagramme de COLEBROOK donne $\lambda = 0,0168$.

La longueur (L) entre le ballon V-01 et l'aspiration de la pompe P-01 est $L = 17,3 + 6,65$, d'où $L = 23,95$ m.

Les coefficients de perte de charge de changement de section donnés par le constructeur NUOVO-PIGNONE'' ξ '' sont :

- Pour les coudes à angle arrandi de 90° , $\xi = 16$ (on a 04 coudes).
- Pour les coudes à angle vif de 60° , $\xi = 7,5$ (on a 2 coudes).
- Pour les vannes, $\xi = 3,5$ (02 vannes).
- Pour le filtre d'aspiration, $\xi = 125$.
- Pour l'entrée de la pompe, $\xi = 0,5$.

La formule (32) donne :

$$\Delta H = \frac{(0,764)^2}{2.9,81} \left(0,0168 \frac{23,95}{40,64.10^{-2}} + (4.16 + 2.7,5 + 2.3,5 + 125 + 0,5) \right) \Rightarrow \Delta H = 6,32 \text{ m}$$

L'application de la formule (29) donne :

$$NPSH_{disp} = \frac{(2,5 - 0,04).10^5}{877,8.9,81} - (9,5 + 6,32) \Rightarrow NPSH_{disp} = 12,747 \text{ m.}$$

On peut dire dans ce cas que le fonctionnement de la pompe est loin de la cavitation, la pompe 141/P-01 fonctionne correctement, $NPSH_{disp} > 4,3$ m.

❖ Cas d'utilisation du Therminol SP :

○ Propriétés process de Therminol SP :

- La masse volumique d'huile : $\rho = 741 \text{ kg/m}^3$.
- Débit volumique d'huile à pomper : $Q_v = \frac{355.877,8}{741} = 420 \text{ m}^3/\text{h}$.
- Température d'aspiration : $T_{asp} = 210^\circ \text{C}$.
- Viscosité cinématique de l'huile :

- à 25 °C : $\nu = 38,4$ Cst.
- à 210 °C : $\nu = 0,92$ Cst.
- Tension de vapeur de l'huile : $TVR = 0,04$ bar.
- Viscosité dynamique : $\eta = 0,68 \cdot 10^{-3}$ Pa.s.

1-détermination des nouvelles caractéristiques de la pompe aux conditions de fonctionnement :

Pour cela il faut corriger la viscosité pour avoir la Hmt ,le rendement et la puissance absorbée dans ces conditions de fonctionnement.

En utilisant le diagramme de correction des caractéristiques des fluides visqueux (voir annexe n°06), les résultats sont indiqués dans le tableau ci-dessous :

Tableau n° 42 : caractéristiques de la pompe 141/P-01 dans le cas de marche avec Therminol SP :

Huile caloporteuse véhiculée		0,6. Q_v	0,8. Q_v	1. Q_v	1,2. Q_v
Caractéristiques de la pompe avec Therminol 66	Débit (Q_v)	213	284	355	426
	Hauteur (Hmt)	110	106	98,6	91
	Rendement (η %)	61	71	77,5	81
Coefficient de correction	K_{Q_v}	1,00	1,00	1,00	1,00
	K_{Hmt}	1,00	0,99	0,97	0,96
	K_{η}	0,88	0,89	0,90	0,91
Caractéristiques de la pompe avec Therminol SP	Q_v , m ³ /h	213	284	355	426
	Hmt , (m)	110	104,94	95,64	87,36
	η , (%)	53,68	63,19	69,75	73,71
	Puissance, Pa (kw)	88,13	95,23	98,28	101,95

On trouve pour $Q_v = 420 \text{ m}^3/\text{h}$, le débit souhaité à pomper, une hauteur manométrique de $H_{mt} = 88,32 \text{ m}$ et un rendement de $\eta = 72,8 \%$.

2-résultats de calcul :

D'après ces nouvelles caractéristiques on détermine les différents paramètres de fonctionnement de la pompe et on vérifié l'état de son fonctionnement avec le Therminol SP :

Les résultats de calcul sont indiqués dans le tableau suivant :

Tableau n°43 :

Paramètre	Therminol SP
Puissance fournie P (kw)	74,9
Puissance absorbée P_a (kw)	102,88
Vitesse de circulation U (m/s)	0,9
Régime d'écoulement Re	$3,98.10^5$
Le coefficient λ	0,015
Perte de charge dans la ligne d'aspiration ΔH (m)	8,768
NPSHdisp (m)	15,573

Dans ce cas le $NPSH_r$, pour un débit de $Q_v = 420 \text{ m}^3/\text{h}$ donne un $NPSH_r = 5 \text{ m}$ (Voir figure n°22).

$NPSH_{disp} > 5\text{m}$, le fonctionnement de la pompe est correct, la pompe fonctionne sans cavitation avec Therminol SP.

❖ interpolation des résultats :

Le tableau suivant regroupe les résultats de calcul de la pompe pour les deux cas de marche (cas actuel et cas avec le Therminol SP) .

Tableau n°44 : résultats du calcul.

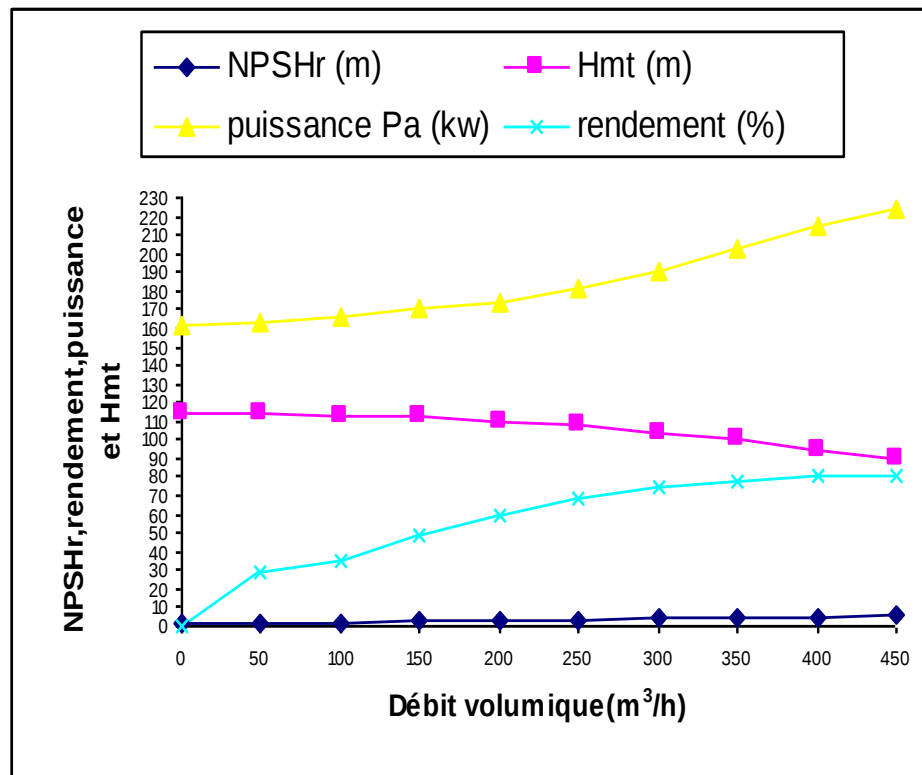
Paramètre	Cas actuel Therminol 66	Cas d'utilisation du Therminol SP
Débit, Q_v (m^3/h)	355	420
Hauteur manométrique, H_{mt} (m)	98,6	88,32
Rendement, η %	77,5	72,8
Puissance fournie, P kw	83,72	74,9

Puissance absorbée, P_a kw	108,02	102,88
NPSHdisp - NPSHr (m)	8,447	10,573

D'après ces résultats, on peut dire que la pompe soit avec Therminol 66 ou Therminol SP travail correctement sans aucun risque de cavitation ,

Dans les deux cas la puissance fournie par la pompe est suffisante pour véhiculer le Therminol SP ou le Therminol 66 à travers les divers équipements du circuit d'huile chaude.

Figure n°22 : caractéristiques de la pompe de circulation d'huile chaude (données par le constructeur).



Conclusion

Conclusion :

Dans ce travail, nous avons étudié la possibilité de substituer le Therminol 66 qui est utilisé maintenant dans le système d'huile chaude à l'unité Hamra avec le Therminol SP qui est déjà importé et stockée dans l'unité de stockage du complexe.

Les résultats obtenus montrent que l'utilisation de Therminol SP permet d'assurer le bon fonctionnement des unités de traitement du gaz (train 10 et 20) et l'unité de distribution de fuel gaz (unités 120), dans les conditions d'exploitation exigées par le procédé sans aucune modification de la conception des équipements.

D'autre part, le calcul thermique des divers équipements d'échange de chaleur ainsi que la vérification du système de circulation d'huile chaude donne :

- une performance convenable pour effectuer le transfert thermique désiré (surface d'échange installée suffisante).
- une puissance satisfaisante de la pompe à véhiculer l'huile à travers les divers équipements.
- les résultats numériques obtenus avec le Therminol SP sont très proches aux résultats obtenus avec le Therminol 66(cas actuel).

À la fin de ce étude on peut conclure que le Therminol SP est adapté aux normes d'utilisation au niveau de système d'huile chaude à l'unité Hamra, donc on peut utiliser le Therminol SP comme fluide caloporteur.

Recommendations

Recommandations :

A l'issue de notre étude, nous recommandons :

1. D'étudier le système d'instrumentation du circuit afin de permettre un bon fonctionnement des divers organes de régulation et contrôle (modifier les points de consignes).
2. de vérifier le fonctionnement et la puissance de pompage des divers pompes de l'unité de stockage et du système de drainage d'huile chaude.
3. vérifier le système d'inertage du ballon tampon et du bac de stockage de l'huile chaude.
4. de suivre la procédure décrite au annexe n°07 avant de procéder à la substitution de Thermin SP ;

Bibliographie

Bibliographie

- [1].Manuel opératoire : Unité 141-volume 16 et 20
Unité 120-volume 17
Hamra.
- [2].Manuel des fournisseurs pour fonctionnement et entretien (Unité Hamra).
- [3].le site web : [www .solutia.com](http://www.solutia.com).
- [4].Technique d'ingénieur : Génie des procédés chimiques, caloporteurs
- [5] . WUTTHIER: Tome 2- Raffinage et Génie chimique, édition technip
- [6]. www.eastman.com/locations
- [7]. <https://www.futura-sciences.com/sciences/definitions/physique-fluide-caloporteur-4499/>
- [8]. <https://www.pirobloc.com/en/hot-oil-heaters-and-thermal-fluids-guide/#principales-operaciones>
- [9]. <https://www.izi-by-edf-renov.fr/blog/fluide-caloporteur>

Annexes

ANNEXE

Annexe n°02 : évolution des propriétés thermiques du Therminol 66 et Therminol SP en fonction de la température.

	Therminol 66	Therminol SP	Therminol 66	Therminol SP	Therminol 66	Therminol SP	Therminol 66	Therminol SP	Therminol 66	Therminol SP
Température (°C)	Masse volumique (kg/m ³)	Masse volumique (kg/m ³)	Conductivité thermique (W/m.K)	Conductivité thermique (W/m.K)	Chaleur massique (kJ /kg.K)	Chaleur massique (kJ /kg.K)	Viscosité dynamique mPa.s	Viscosité dynamique mPa.s	Pression de vapeur (kPa)	Pression de vapeur (kPa)
0	1021,5	885	0,118	0,131	1,495	1,834	1324,87	143,3	-	-
20	1008,4	872	0,118	0,128	1,562	1,906	123,47	41,6	-	-
40	995,2	858	0,117	0,126	1,630	1,978	29,50	16,3	-	-
60	981,9	845	0,116	0,124	1,699	2,049	11,53	7,9	-	-
80	968,5	831	0,115	0,122	1,768	2,120	5,93	4,5	0,02	-
100	955	818	0,114	0,119	1,837	2,191	3,60	2,88	0,05	-
120	941,4	804	0,112	0,117	1,908	2,262	2,42	2,00	0,12	-
140	927,6	790	0,111	0,115	1,978	2,333	1,75	1,48	0,27	0,2
160	913,6	777	0,109	0,112	2,050	2,403	1,34	1,14	0,58	0,5
180	899,5	762	0,107	0,110	2,122	2,474	1,06	0,91	1,17	1,1
200	885,1	748	0,106	0,107	2,195	2,544	0,86	0,75	2,23	2,2
220	870,4	734	0,104	0,105	2,268	2,614	0,72	0,63	4,06	4,1
240	855,5	719	0,102	0,103	2,342	2,684	0,61	0,53	7,10	7,4
260	840,3	704	0,099	0,100	2,417	2,755	0,53	0,45	11,95	12,8
280	824,6	688	0,097	0,098	2,492	2,825	0,46	0,39	19,46	21,3
300	808,5	672	0,095	0,096	2,569	2,896	0,41	0,33	30 ,73	34,4
320	792	655	0,092	0,093	2,647	2 ,967	0,37	0,29	47,20	53,7
330	783,5	646	0,091	0,092	2,686	3,003	0,34	0,27	57,94	66,3

Annexe n°03 : courbe de détermination du coefficient j_h et le facteur de friction f_t à coté tube

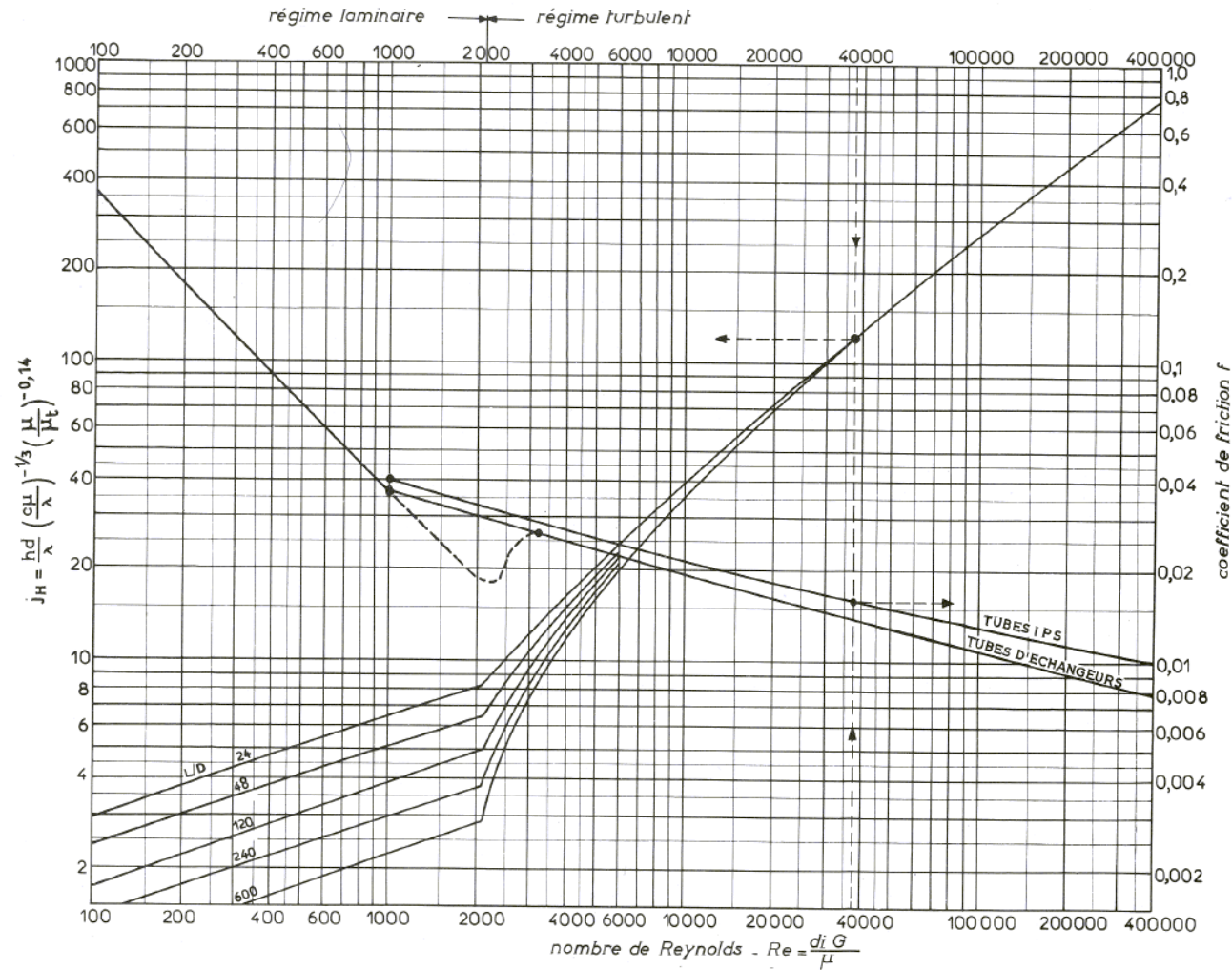


Fig. V.1.20. — Coefficient de transfert et coefficient de friction en fonction du nombre de Reynolds, à l'intérieur des tubes.

Annexe n°04 : courbe de détermination du coefficient j_h et le facteur de friction f_t à coté calandre

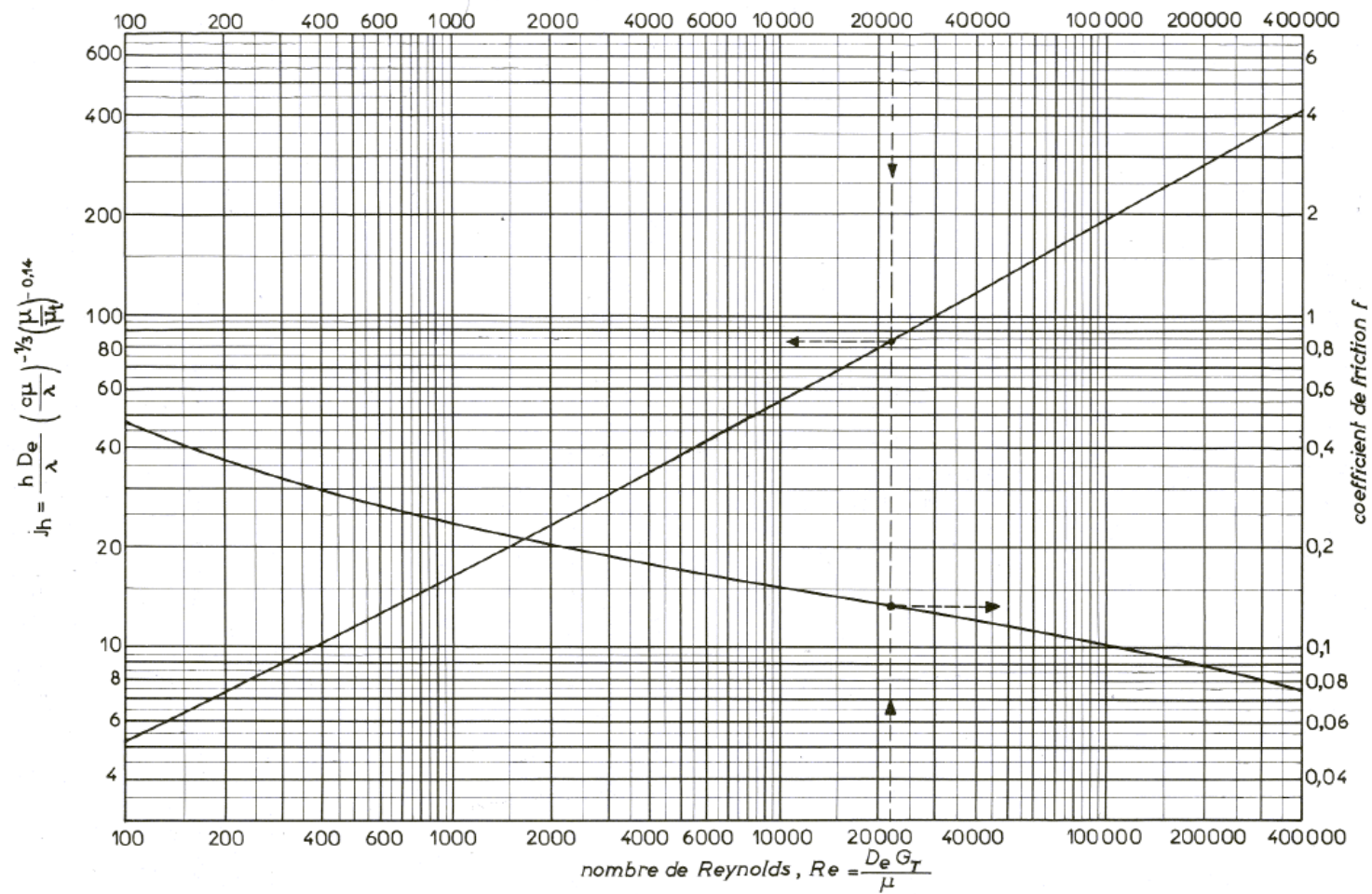
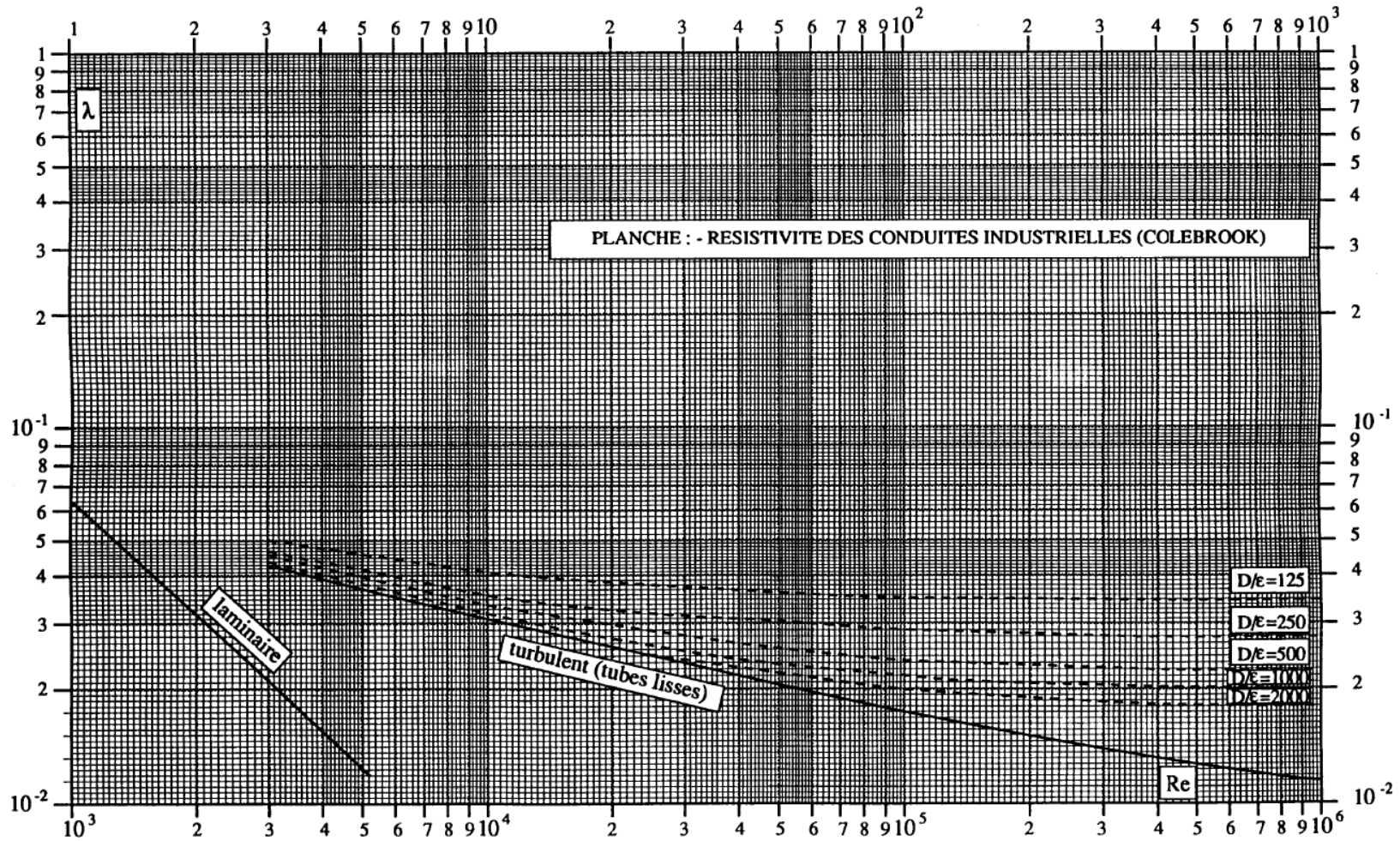


Fig. V.1.26. — Coefficient de transfert et coefficient de friction en fonction du nombre de Reynolds modifié, à l'extérieur des tubes.

Annexe n°05 : variation du coefficient de perte de charge régulière λ en fonction de Reynolds et la rugosité relative.



Annexe n°06 : courbes de correction des caractéristiques d'une pompe centrifuge pour les fluides visqueux

1456

LE PÉTROLE . RAFFINAGE ET GÉNIE CHIMIQUE

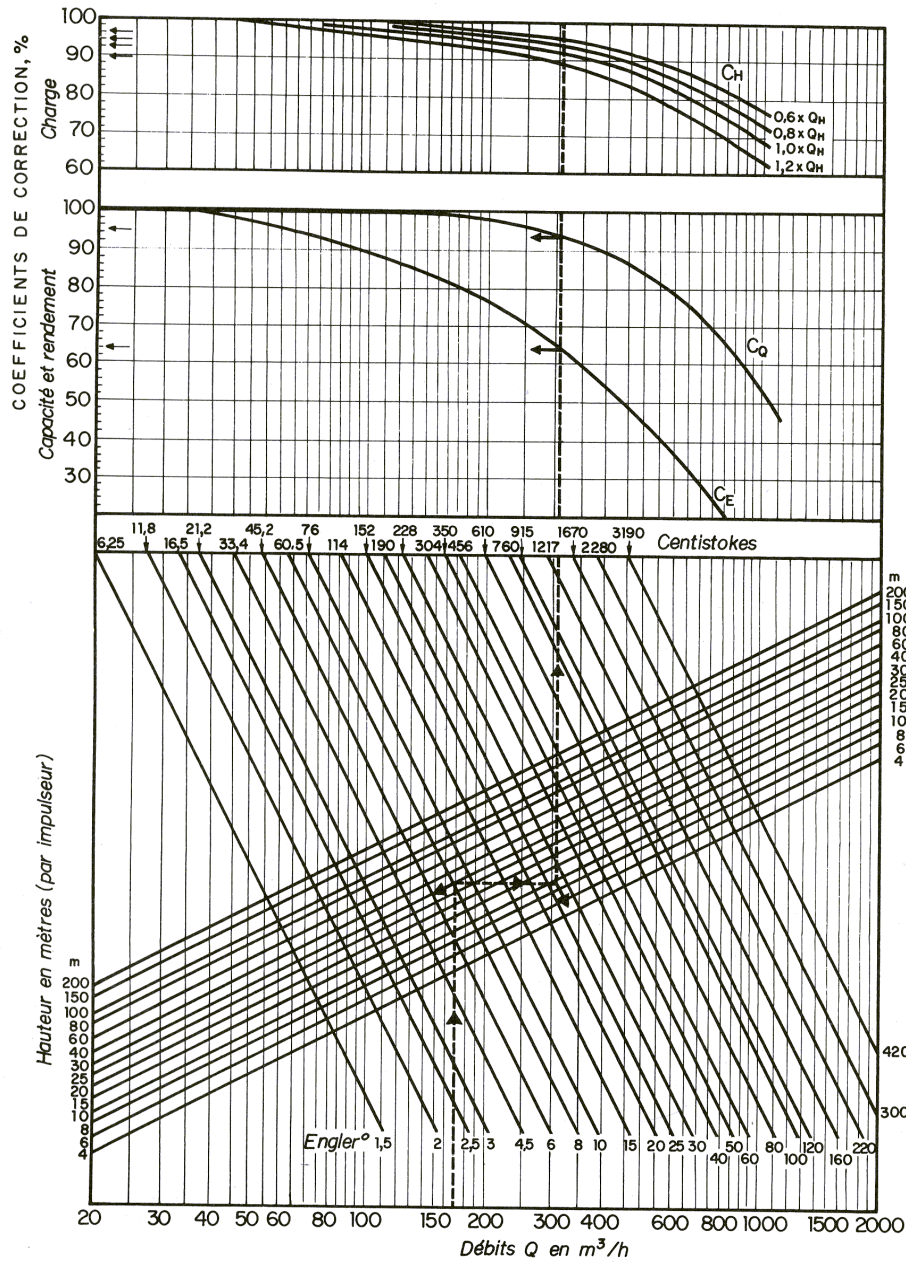


Fig. V.11.13. — Abaque de correction des caractéristiques pour liquides visqueux.

Annexe n°07 :

Procédure à suivre lors du remplacement d'un fluide caloporteur par un autre dans un système existant.

Le degré de difficulté dépend entièrement du système de procédé existant, la conversion peut être aussi facile qu'enlever un fluide et le remplacer par un autre sans modifier la conception exigée des équipements.

Les facteurs suivants doivent être considérés en changeant un type de fluide caloporteur par un autre :

- Le nouveau fluide peut-il être utilisé à la température de fonctionnement exigée ?
- Quel est l'état de phase du nouveau fluide à la température de fonctionnement maximum ? la pression de vapeur du nouveau fluide peut être sensiblement plus haute, probablement excédant des limitations de pression d'équipement.
- Les soupapes de décompression sont-elles tarées correctement pour le nouveau fluide ? les pressions dans le système sont-elles appropriées ?
- Comment le nouveau fluide effectuera-t-il l'opération du transfert de chaleur ? si le nouveau fluide a un coefficient de film inférieur à celui du fluide utilisé, est-ce que le fonctionnement des échangeurs de chaleur, des fours ou des réfrigérateurs sera défavorablement affecté ? si le fluide a une chaleur spécifique inférieure y a-t-il assez de capacité thermique ?
- Comment le nouveau fluide effectuera-t-il l'écoulement hydraulique dans le système ? si le nouveau fluide a une chute de pression plus élevée ou si le nouveau fluide exige un taux plus élevé de circulation les pompes existantes du système seront-elles capables pour faire face à l'augmentation exigée ?
- Le réservoir d'expansion est-il approprié pour le nouveau fluide ?
- y a-t-il des problèmes concernant la réactivité chimique du nouveau fluide ? est-ce que des modifications de point de vue environnementales d'emplacement sont nécessaires ?

- Combien de fois le système doit être nettoyé complètement avant de procéder au remplacement ? est ce que ce fluide à remplacer nécessite un nettoyage chimique ?

RESUME

Les huiles de chauffage sont importantes dans notre vie quotidienne et pratique. L'objectif principal de cette étude est la possibilité d'utiliser le Therminol SP comme fluide caloporteur à la place du Terminol 66 dans l'unité Hamra.

Après étude des échangeurs de la train 10 , on peut conclure que le Therminol SP est adapté aux critères d'utilisation au niveau du circuit d'huile chaude de l'unité Hamra, permettant d'utiliser Therminol SP comme fluide caloporteur.

Mots clés: therminol , gaz, échangeur , fluide caloporteur .

ABSTRACT

Heating oils are important in our daily and practical life.

The main objective of this study is the possibility of using Therminol SP as a heat transfer fluid instead of Terminol 66 in the Hamra unit.

After studying the train 10 exchangers, it can be concluded that Therminol SP is suitable for the criteria for use in the hot oil circuit of the Hamra unit, allowing Therminol SP to be used as a heat transfer fluid.

Keywords: therminol , gas, exchanger , heat transfer fluid .

نبذة مختصرة

زيوت التدفئة مهمة في حياتنا اليومية والعملية.

الهدف الرئيسي من هذه الدراسة هو إمكانية استخدام Therminol SP كسائل نقل حراري بدلاً من Terminol 66 في وحدة الحمرا.

بعد دراسة 10 مبادلات للقطار ، يمكن الاستنتاج أن Therminol SP مناسب لمعايير

الاستخدام في دائرة الزيت الساخن لوحدة الحمرا ، مما يسمح باستخدام Therminol SP كسوائل نقل حرارة.

الكلمات المفتاحية: ثيرمينول ، غاز ، مبادل ، سائل نقل الحرارة.