

32/02



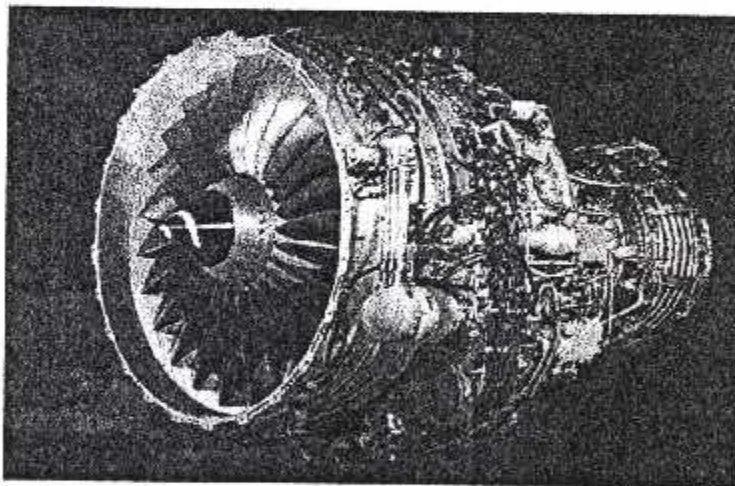
REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
UNIVERSITE DE BLIDA

INSTITUT D'AERONAUTIQUE DE BLIDA (I.A.B)
Département Propulsion

027/2002

Mémoire de fin d'étude en vue d'obtention du diplôme d'étude
universitaire appliquée (DEUA)

ETUDE ET CONCEPTION D'UN ECHANGEUR HUILE-CARBURANT



EN UTILISANT LES DONNEES DU TURBOREACTEUR

CFM56-7B

REALISE PAR :

- BELLOUT Said
- DJAFFAR Mehdi

PROMOTEUR : - NECHE Ahmed

COPROMOTEUR: - GUELLATI Karim

SESSION 2001/2002

DEDICACE

Je dédie mon travail avant tout a mes parents :

- ma mère qui me connaît bien et qui sait pourquoi je lui dédie ce travail en premier ..
- mon père que j'aime beaucoup pour sa sagesse et la valeur qui me donne.

J'ai sus leur importance en vivant loin d'eux.

- Je le dédie aussi a mes frères ALI , AHMED, AZZEDINE.
- A DJALLEL pour ses aides.
- A ma famille surtout ALOUCHE BADER EL DINE , mes cousine et cousines.
- A mes vrais amies : Mehdi , Moussa, khalid, Zuno, Saadek ,Boualeme, Assia, Yacemine ,.....et tous les gens j'aime.

Said BELLOUT
(future diplômé en propulsion)

DEDICACES

Je dédie ce travail a :

- Ma chère mère .
- Mon père qui ma dirigé et encouragé .
- Mes frères : Mohamed , Adel , Halim , Hichem et ma soeur Lilia .
- Mes amies : Hamza , Athir , Mohamed , Said , Naim , Bilal , Lyas
- A toute ma famille.
- Mon binome said qui ma aidé .

- DJAFFAR Mehdi -

REMERCIEMENTS

On tient à exprimer nos sincères remerciements, premièrement, à notre promoteur monsieur AHMED NECHE de nous avoir encadré durant notre travail et pour ses raisons.

On remercie aussi les responsables de l'institut d'aéronautique :

- M. Said BERGUEL (le directeur de l'institut).
- M. Djamel MOKHTARI et M. Abdel karim ZENNIR (atelier de propulsion).
- M. Abdel Rezzak DAOUADJI et M. Rabeh (atelier de structure).
- M. Hocine BENTRAD .
- M. Djallel (centre de calcul de l'institut d'aéronautique).
- M. Larbi FARID (enseignant de transfert chaleur).

On remercie aussi les responsables et ingénieurs d'**AIR ALGERIE** :

- M. karim GUELLATI (AH400).
- M. Sid ALI HADJ KALI.
- M. Azzedine GHRIB (atelier AH400).
- M. Slimani (réglementation aérienne).

Et tous les enseignants de **I.I.A.B** qui ont assuré notre formation.

SOMMAIRE

INTRODUCTION	Page 01
CHAPITRE I :	DESCRIPTION GENERALE
I-1- DESCRIPTION GENERALE DU MOTEUR.....	Page 02
I-2- PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT.....	Page 02
I-3- LES DIFFERENTES PARTIES DU MOTEUR.....	Page 02
I-4- CARACTERISTIQUES GENERALES DU MOTEUR.....	Page 03
I-5- CIRCUIT DE LUBRIFICATION DU MOTEUR.....	Page 04
I-5-1- CIRCUIT DE REFOULEMENT.....	Page04
I-5-2- CIRCUIT DE RECUPERATION.....	Page06
I-6- CIRCUIT DE CARBURANT DU MOTEUR.....	Page09
I-6-1- FONCTIONNEMENT DU CIRCUIT CARBURANT.....	Page09
I-7- ECHANGEUR DE CHALEUR HUILE/CARBURANT.....	Page11
I-7-1- GENERALITE.....	Page11
I-7-2- DESCRIPTION.....	Page11
I-7-3- MODE OPERATOIRE.....	Page12
CHAPITRE II:	EQUATIONE DE BASE DU DIMENSIONNEMENT DES ECHANGEURS
II-1- CLASSIFICATION DES ECHANGEURS SELON LES ECOULEMENTS.....	Page15
II-1-1- ECHANGEUR A COURANT PARALLELE.....	Page15
II-1-2- ECHANGEUR A CONTRE-COURANT.....	Page15
II-2- EQUATION DE BASE EN ECHANGE DE CHALEUR.....	Page16
II-3- DIMENSIONNEMENT DE L'ECHANGEUR.....	Page19
II-3-1- INTRODUCTION.....	Page19
II-3-2- SURFACES DE REFERENCE.....	Page20
II-4- ETUDE DES PERTES DE CHARGE DANS UN ECHANGEUR.....	Page23
II-4-1- INTRODUCTION.....	Page23
II-4-2- PERTE DE CHARGE A L'INTERIEUR DU TUBE.....	Page23
II-4-3- RELATIONS EMPIRIQUES ADOPTEES POUR LE COEFFICIENT.....	
DE PERTES DE CHARGE LINEAIRES λ	Page23
CHAPITRE III:	METHODE DE CONCEPTION DE L'ECHANGEUR
III-1- DEFINITION DU PROBLEME.....	Page25
III-2- MODELISATION DU PROBLEME.....	Page25
III-2-1- ETABLISSEMENT DES EQUATIONS.....	Page25

III-3- CALCUL DES PERTES DE CHARGE.....	Page29
III-4- ANALYSE DES EQUATIONS.....	Page31
III-5- ORGANIGRAMME DU CALCUL DE L'ECHANGEUR.....	Page32

CHAPITRE IV:.....DIMENSIONNEMENT ET CALCUL

IV-1- INTRODUCTION.....	Page33
IV-2- RESULTATS.....	Page33

CONCLUSIONPage66

BIBLIOGRAPHIEPage67

ANNEXE : PROGRAMME FORTRAN 77 DE CALCUL

I-1/- DESCRIPTION GENERALE DU MOTEUR :

Le moteur CFM56-7B est un turbo Fan, double corps à flux axial à haut taux de dilution.

Il équipe la dernière génération des Boeing 737 (-600, -700, -800, -900, C40A, BBj .)

Le moteur fourni la poussée à l'avion et la puissance aux systèmes avion suivants :

- Electrique.
- Hydraulique .
- Pneumatique .

I-2/-PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT :

Le principe utilisé pour créer la poussée du moteur est le même que celui qui sert aux vieux avions à hélice, il faut accélérer l'air qui se présente devant le moteur et le rejeter vers l'arrière pour qu'il puisse faire avancer l'avion, c'était l'hélice, qui tournant à grande vitesse permettait cela.

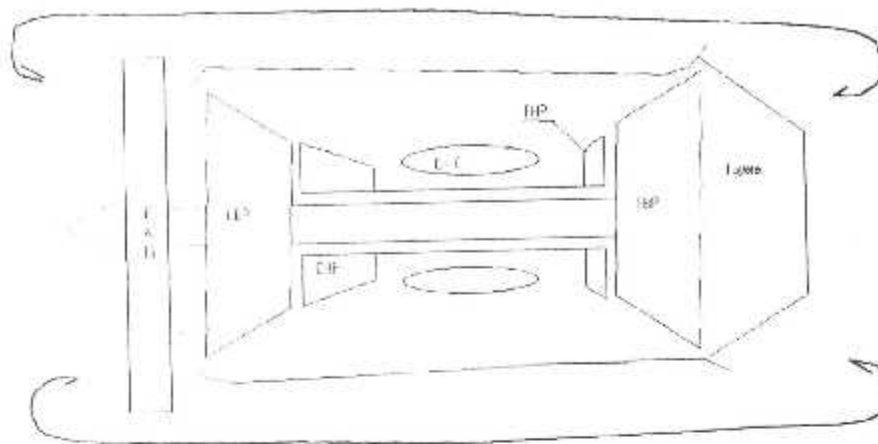
Aujourd'hui cette action est essentiellement réalisée à l'aide de la grande soufflante qui se trouve à l'avant du turboréacteur. Seul le système de mise en rotation de l'hélice à été modifié.

I-3/-LES DIFFERENTES PARTIES DU MOTEUR :

Vous trouverez ci-dessous une photo en coupe du CFM56-7b ainsi qu'un schéma illustrant de manière simplifiée le moteur à double flux.

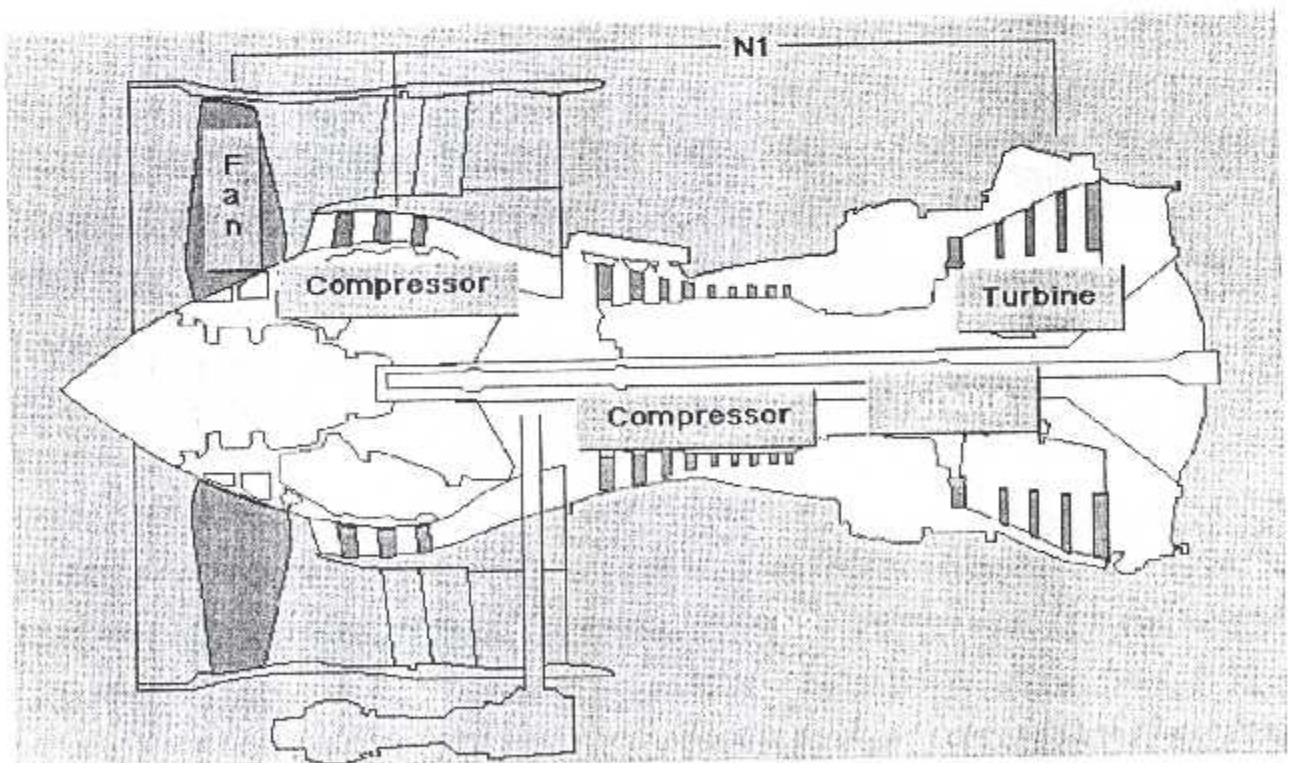
Voici les différentes composantes de ce moteur (se référer au dessin) :

- la soufflante, hélice de grand diamètre (61 inches).
- Le compresseur haute pression (HP), il y a 9 étages de compression avec alternance de rotor et stator.
- La chambre de combustion, c'est là que se fait la réaction de combustion du kérosène.
- Les turbines haute et basse pression (HP et BP), lieu de détente du gaz il y a 5 étages de turbines, 1HP et 4 BP.
- La tuyère.



I-4/-CARACTERISTIQUES GENERALES DU MOTEUR :

- Poussée : 9 Tonnes.
- Poids : 2,4 Tonnes .
- Longueur : 2,51 mètres.
- Diamètre de Fan : 1,55 mètres



- Photo en coupe du CFM56-7B -

I-5/ - CIRCUIT DE LUBRIFICATION DU MOTEUR :

Le système d'huile du moteur lubrifie , refroidie et nettoie les paliers et les pignons du moteur.

L'huile de lubrification utilisée pour le moteur est l'huile(mobil jet oil II)
Cette huile doit répondre aux exigences suivantes :

- Pouvoir lubrifiant.
- Viscosité constante.
- Point d'éclair élevé.
- Point de congélation bas.

Le circuit de lubrification de ce moteur comprend deux sous circuit :

I-5-1/- Circuit de refoulement :

L'huile du réservoir passe à travers la valve anti-fuite vers la pompe de refoulement. La pompe pressurise l'huile vers le filtre de refoulement, la valve de by-pass du filtre de refoulement surveille la différence de pression à travers le filtre de refoulement.

Si le filtre se colmate, la valve s'ouvre. l'huile coule à travers ces conduites de refoulement vers :

- Palier avant.
- Palier arrière.
- AGB et TGB .

On présente ci-dessous le circuit de refoulement de l'huile de graissage :

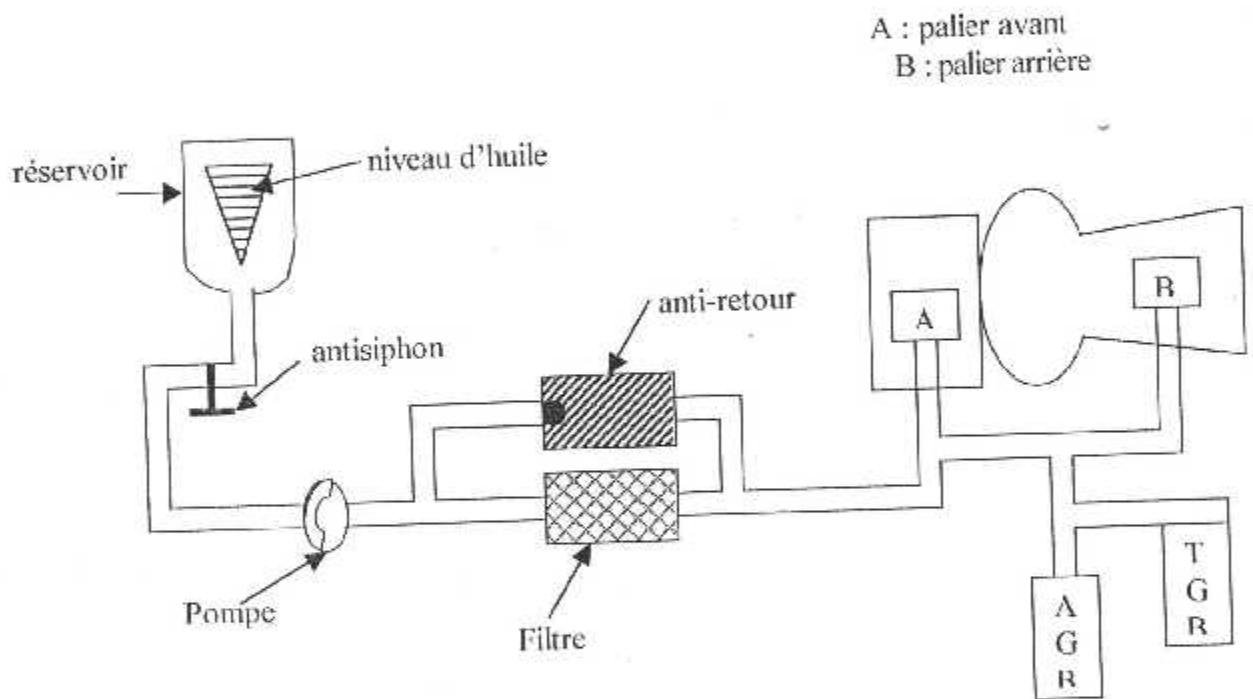


Figure (I-1) : Circuit de refoulement

I-5-2/- Circuit de récupération :**Fonctionnement :**

Des paliers du moteur et des boites d'engrenage, l'huile récupérée passe à travers quatre (04) détecteurs de surveillance de débris (chip detector).

Il y a un détecteur pour chaque ligne de récupération suivante :

- palier arrière
- AGB et TGB
- Palier avant

L'huile passe par les pompes de récupération, chaque pompe envoie l'huile dans une ligne de récupération, ensuite il va au filtre de récupération.

La valve de by-pass du filtre s'ouvre si la différence de pression en travers du filtre est au-dessus des limites.

L'huile filtrée coule à travers le servo réchauffeur de carburant en suite à travers l'échangeur principal huile/carburant.

Il y a une valve de by-pass dans l'échangeur principal huile / carburant.

Si l'échangeur se colmate, la valve s'ouvre et le servo réchauffeur carburant et l'échangeur sont by-passés.

L'huile revient au servo réchauffeur carburant en suite il s'infiltré vers le réservoir.

On présente dans le schéma ou dessous, le circuit de récupération de l'huile.

A : palier avant
B : palier arrière

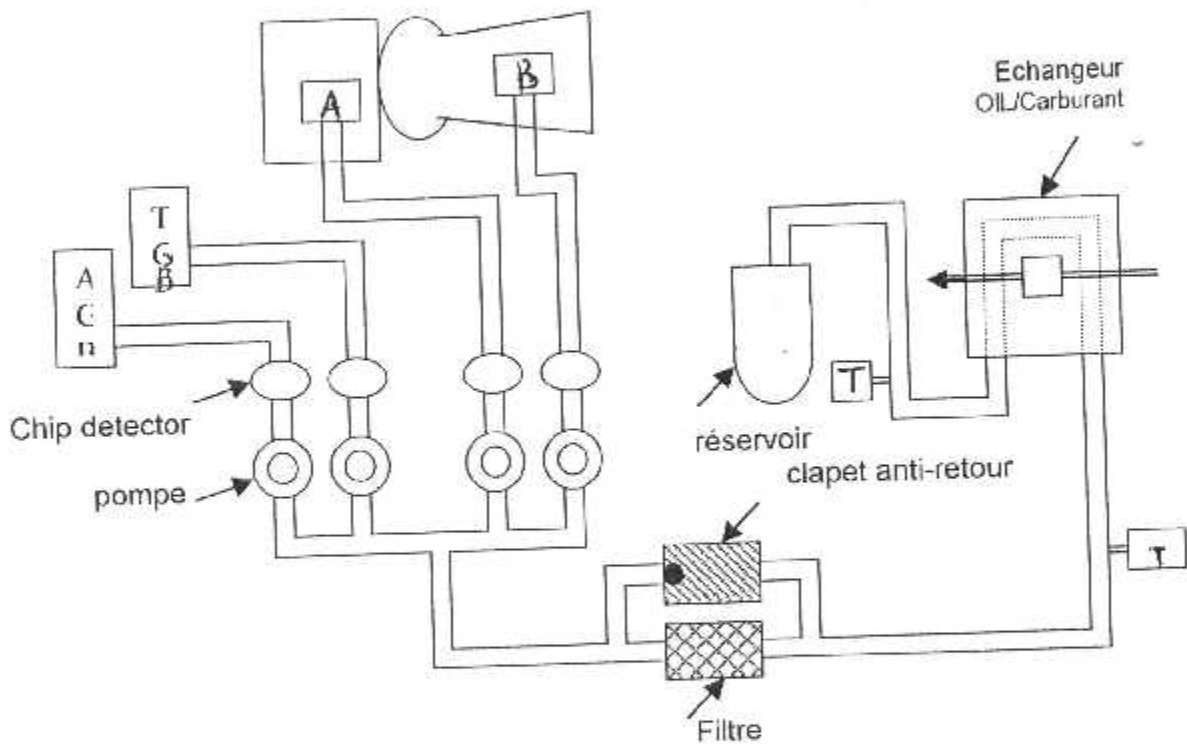


Figure (I-2) : Circuit de récupération

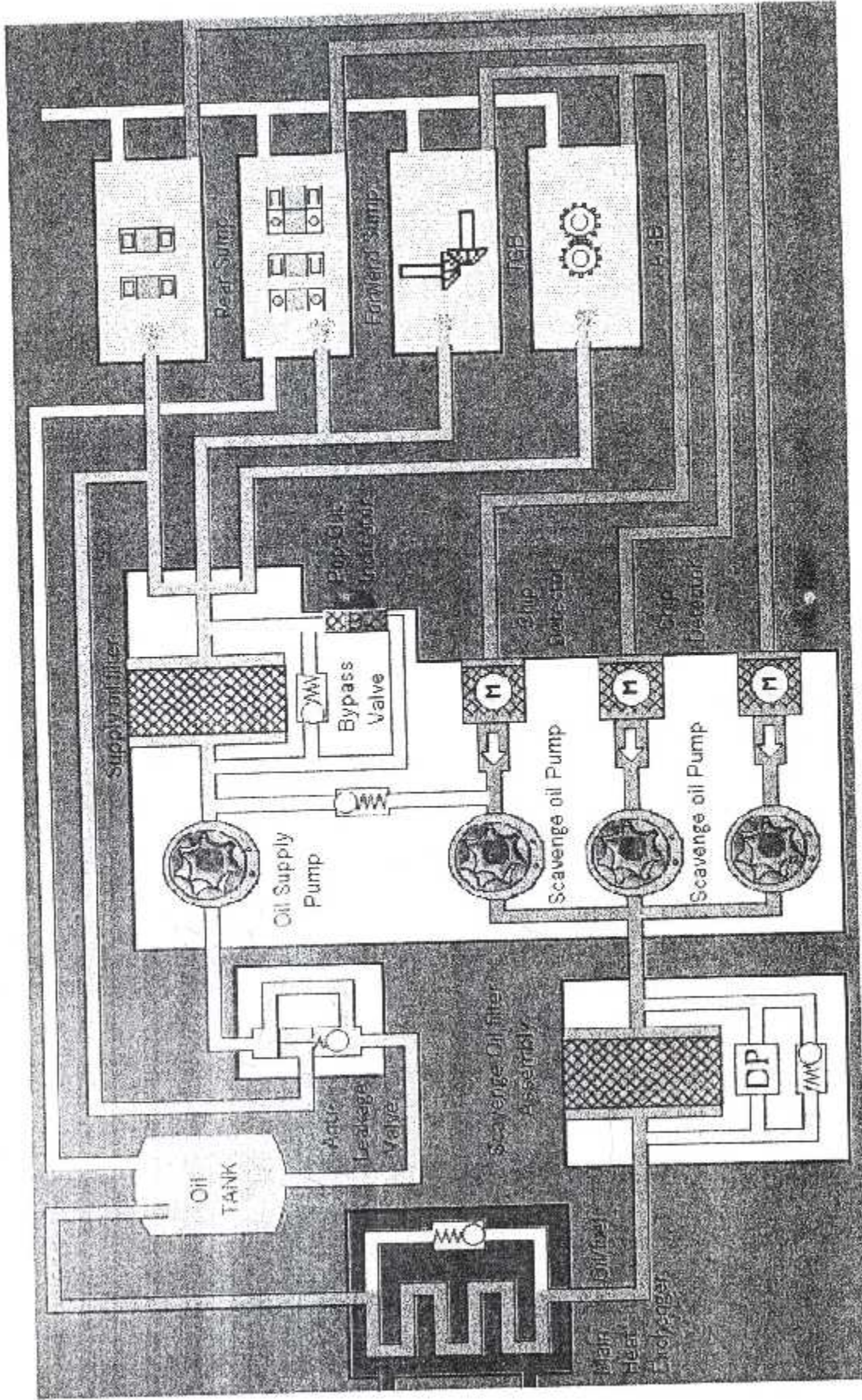


Figure (I-3) : CIRCUIT DE LUBRIFICATION

I-6/- CIRCUIT CARBURANT DU MOTEUR :

Le circuit carburant délivre le carburant à l'engin pour assurer la combustion et le fonctionnement du moteur.

Le circuit carburant se compose de :

- une pompe carburant .
- un échangeur principal l'huile / carburant .
- un filtre principal carburant .
- un régulateur principal carburant (HMU).
- un réchauffeur carburant servo .
- un débitmètre.
- un échangeur huile /carburant (IDG) Alternateur.
- trente injecteurs.

Le carburant utilisé est le kerozene (Jet A₁) qui caractérisé par :

- Densité : non limitée , elle est généralement de 0,8 et varie avec les conditions atmosphériques.
- Point éclair 38°C , viscosité : 6 centistokes à (-18°C).
- Point de congélation – 40°C .

I-6-1/- Fonctionnement du circuit carburant :

Le carburant arrive des réservoirs avion vers l'entrée de la pompe carburant, il passe dans l'échangeur huile /carburant dans le but de refroidir l'huile de graissage moteur et de réchauffer le carburant pour faciliter sa détonation, de l'échangeur vers le filtre principal à la sortie du filtre carburant puis il passe vers :

- Le régulateur carburant pour aller vers les injecteurs.
- Le servo ré chauffeur carburant ou il sera réchauffer par l'huile moteur dans le but d'éviter le givrage carburant.

A la sortie du régulateur carburant, le carburant passe à travers le Débitmètre puis vers l'échangeur huile /carburant alternateur pour ensuite s'acheminer vers les injecteurs.

I-7/-ECHANGEUR DE CHALEUR HUILE / CARBURANT :**I-7-1/ Généralité :**

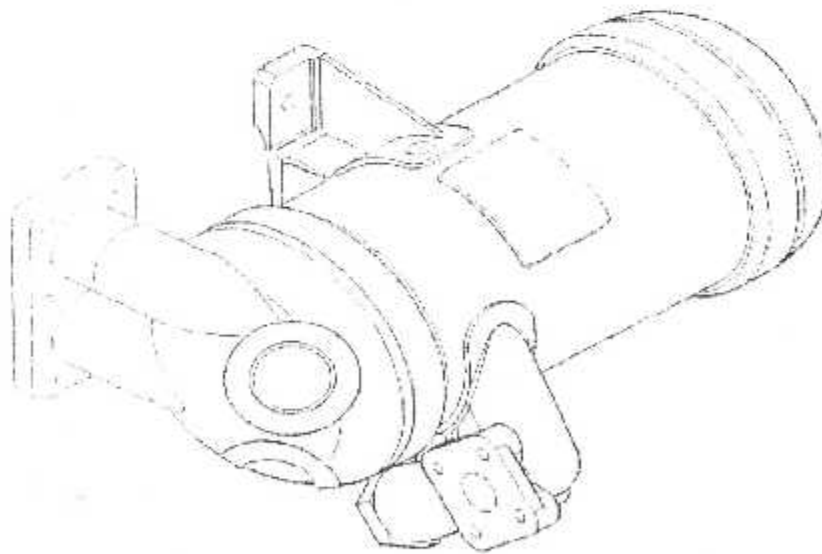
L'échangeur huile / carburant est utilisé sur le moteur de l'avion principalement pour refroidir l'huile de lubrification.

I-7-2/ Description :

L'échangeur de chaleur consiste essentiellement en un fuseau tubulaire monté dans un logement cylindrique de calandre.

L'échangeur de chaleur possède deux entrées et deux sorties une entrée et une sortie permet le passage de l'huile de récupération (lubrification) autour des tubes externes la deuxième entrée et sortie de carburant à l'intérieur du fuseau tubulaire.

Une soupape de sécurité qui consiste principalement un reniflard fermé à ressort monté dans un guide et un camp cylindrique est installé entre l'admission d'huile et les orifices de sortie (voir la figure 1).



Echangeur de chaleur fuel-oil

Figure (1)

La soupape de sécurité permet le by-passe d'huile à l'entrée et la sortie en cas de colmatage.

1-7-3/ Mode opératoire :

La chaleur emmagasinée dans l'écoulement d'huile autour des tubes est transférée au carburant traversant les tubes pour le réchauffer.

La soupape de sécurité s'ouvre pour permettre à l'huile de contourner l'échangeur une fois, il y a une chute de pression dans le chemin d'écoulement d'huile à l'extérieur du tube.

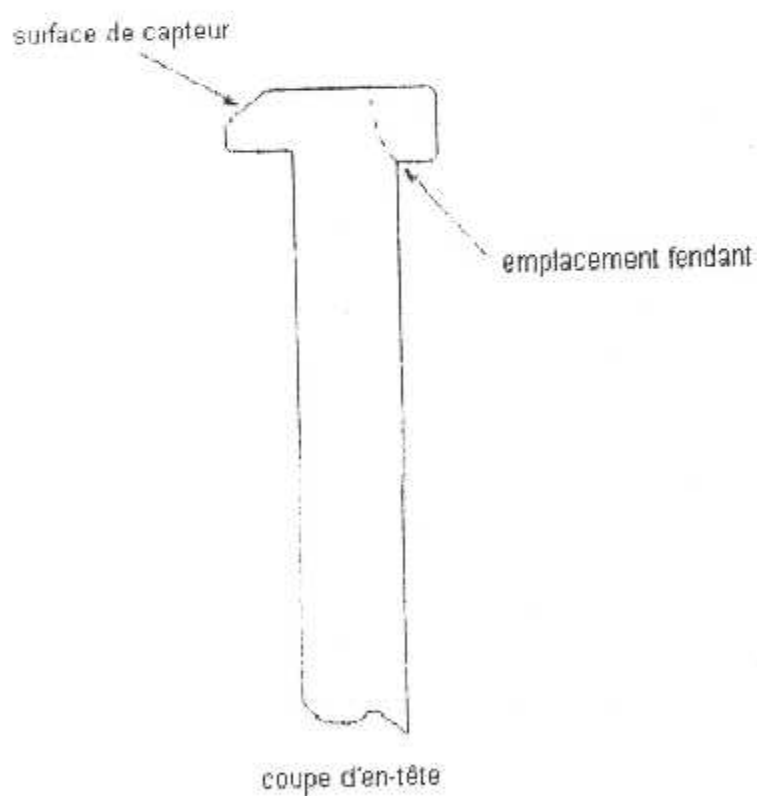
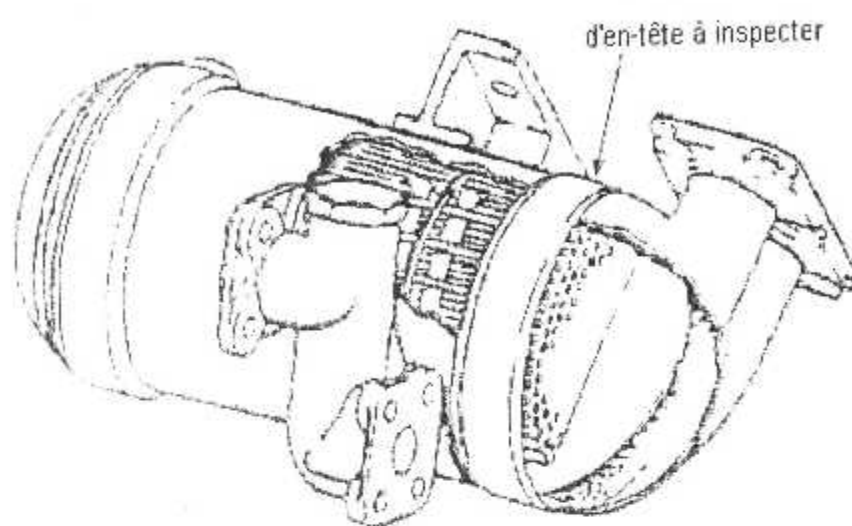
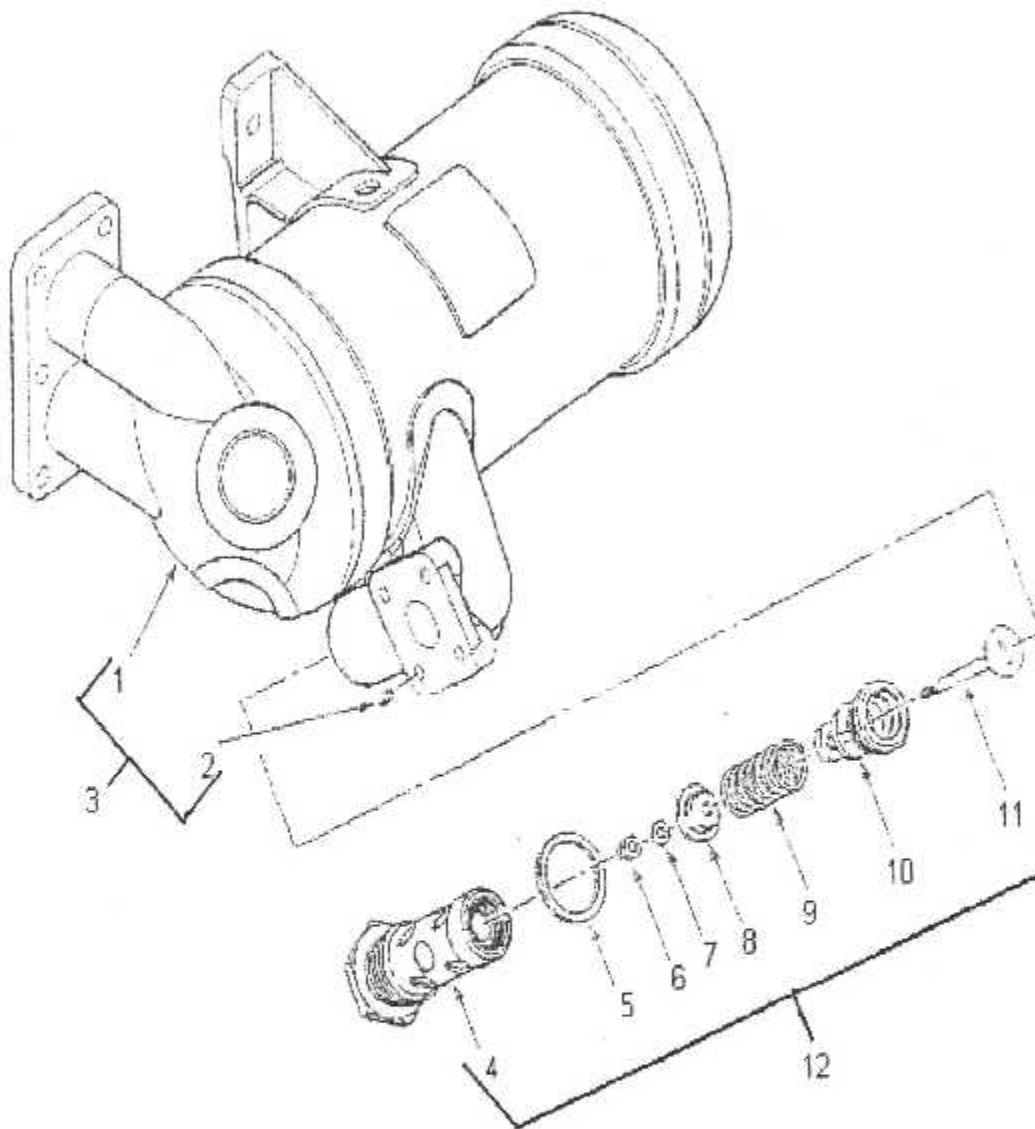


Figure (I-5) : Endroit de fente d'échangeur ed chaleur



- 1 : acier usiné .
- 2 : insertion .
- 3 : by-pass .
- 4 : cage .
- 5 : camp .
- 6 : écrou .

- 7 : Garniture .
- 8 : Rondelle .
- 9 : Ressort de compression .
- 10 : Guide - clapet .
- 11 : Valve - clapet .
- 12 : Valve de by - bass d'huile

Figure (I-6): Echangeur de chaleur fuel / oil

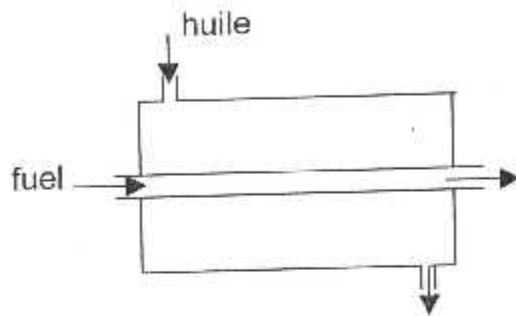
CHAPITRE II

EQUATIONS DE BASE DU DIMENSIONNEMENT DES ECHANGEURS

II-1/ - CLASSIFICATION DES ECHANGEURS SELON LES ECOULEMENTS :

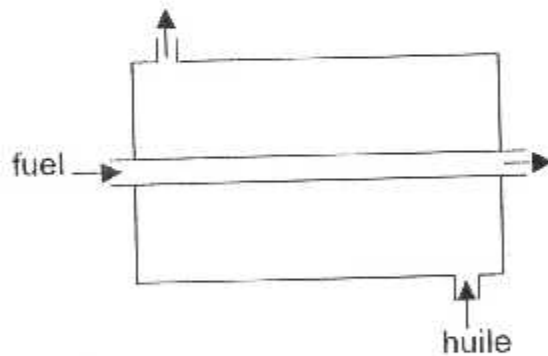
On classe les échangeurs selon le sens des écoulement des deux fluides (chaud et froid).

II-1-1/ - Echangeurs à courant parallèle :



Systeme de deux
Cylindres coaxiaux.

II-1-2/ - Echangeurs à contre-courant :



Systeme de deux
Cylindres coaxiaux

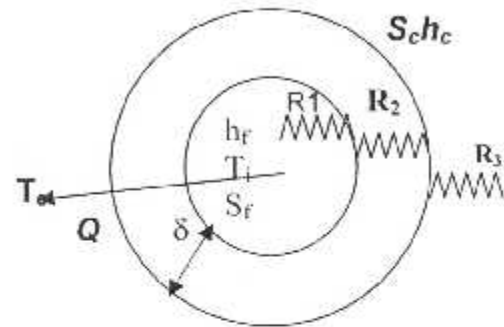
II-2/ - LOIS DE BASE EN ECHANGE DE CHALEUR :

On évalue les différentes résistances :

$$R_1 = \frac{1}{h_f \cdot S_f}$$

$$R_2 = \frac{\delta}{S_m \cdot \lambda}$$

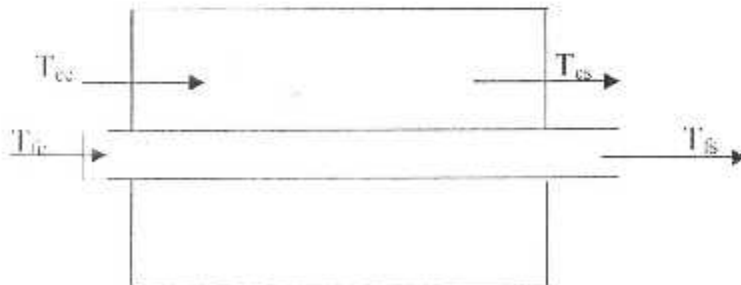
$$R_3 = \frac{1}{h_c \cdot S_c}$$

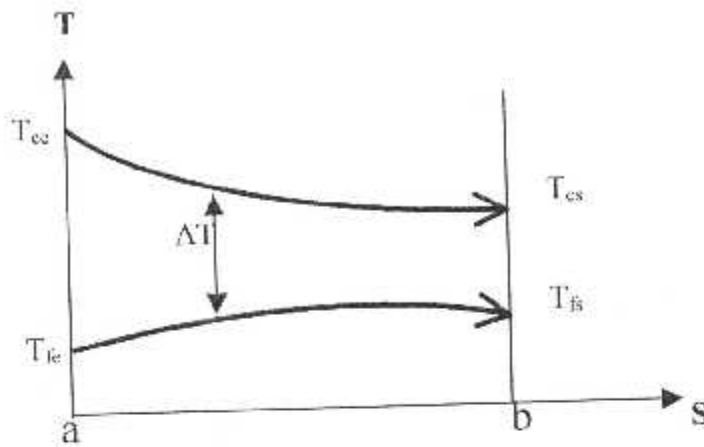


$$Q = \frac{T_i - T_e}{\left(\frac{1}{h_f \cdot S_c} + \frac{\delta}{S_m \cdot \lambda} + \frac{1}{h_c \cdot S_f} \right)} = K \cdot S_r \cdot (T_i - T_e) \tag{II-1}$$

- h : Coefficient de transfert convectif.
- λ : Coefficient de transfert conductif.
- K : Coefficient global d'échange.
- S_r : Surface de référence .
- T_i : Température intérieure .
- T_e : Température extérieure .

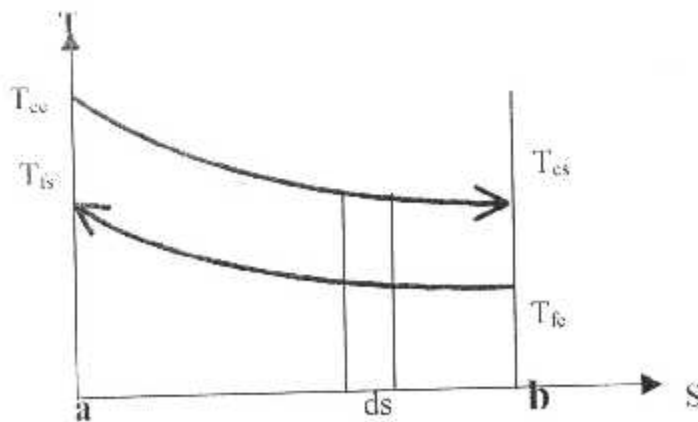
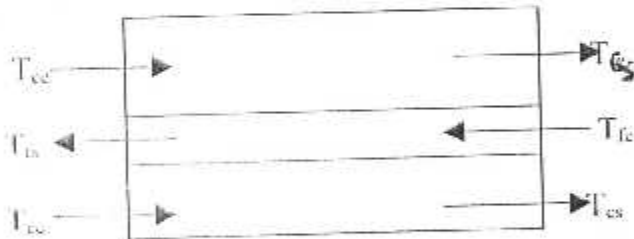
Echangeur à courants parallèles :





T : la température
S : la surface

- Echangeur à contre-courant :



Dans ce cas, il peut possible d'avoir $T_{fs} > T_{cs}$

(Echangeur le plus performant) :

$$dq = -m_c.C_{pc}.dT_c = -m_f.C_{pf}.dT_f$$

$$d(T_c - T_f) = -dq \left[\frac{1}{m_c.C_{pc}} - \frac{1}{m_f.C_{pf}} \right]$$

$$q = K.S(T_c - T_f)$$

D'où :

$$d(T_c - T_f) = -K.dS(T_c - T_f) \left[\frac{1}{m_c.C_{pc}} - \frac{1}{m_f.C_{pf}} \right]$$

$$\boxed{\frac{d(T_c - T_f)}{T_c - T_f} = -K.dS \left[\frac{1}{m_c.C_{pc}} - \frac{1}{m_f.C_{pf}} \right]} \quad (II-2)$$

La quantité de chaleur cédée par le flux chaud Q est égale à la quantité récupérée par le flux froid

$$\boxed{Q = m_c.C_{pc}(T_{ce} - T_{cs}) = m_f.C_{pf}(T_{fs} - T_{fe})} \quad (II-3)$$

$$\frac{1}{C_{pc}.m_c} = \frac{T_{ce} - T_{cs}}{Q} = \frac{T_{fs} - T_{fe}}{Q}$$

$$\frac{d(T_c - T_f)}{T_c - T_f} = -K \frac{dS}{Q} [(T_{ce} - T_{cs}) - (T_{fs} - T_{fe})] \quad \text{d'après l'équation (II-2)}$$

On intègre entre l'entrée et la sortie :

$$\ln(T_c - T_f) \Big| = -K.S \left[\frac{(T_{ce} - T_{cs}) - (T_{fs} - T_{fe})}{Q} \right]$$

$$Q = K.S \frac{(T_{ce} - T_{fs}) - (T_{cs} - T_{fe})}{\ln \left(\frac{T_{ce} - T_{fs}}{T_{cs} - T_{fe}} \right)}$$

$$\Delta T = \frac{\Delta T_c - \Delta T_s}{\ln \left(\frac{\Delta T_c}{\Delta T_s} \right)}$$

En cas général :

$$\Delta T = \frac{\Delta T_a - \Delta T_b}{\ln \left(\frac{\Delta T_a}{\Delta T_b} \right)}$$

avec :

$$\Delta T_a = T_{ce} - T_{fs}$$

$$\Delta T_b = T_{cs} - T_{fe}$$

a et **b** les extrémités de l'échangeur .

$$Q = K.S.\overline{\Delta T} \tag{II-4}$$

II-3/- DIMENSIONNEMENT DE L'ECHANGEUR :

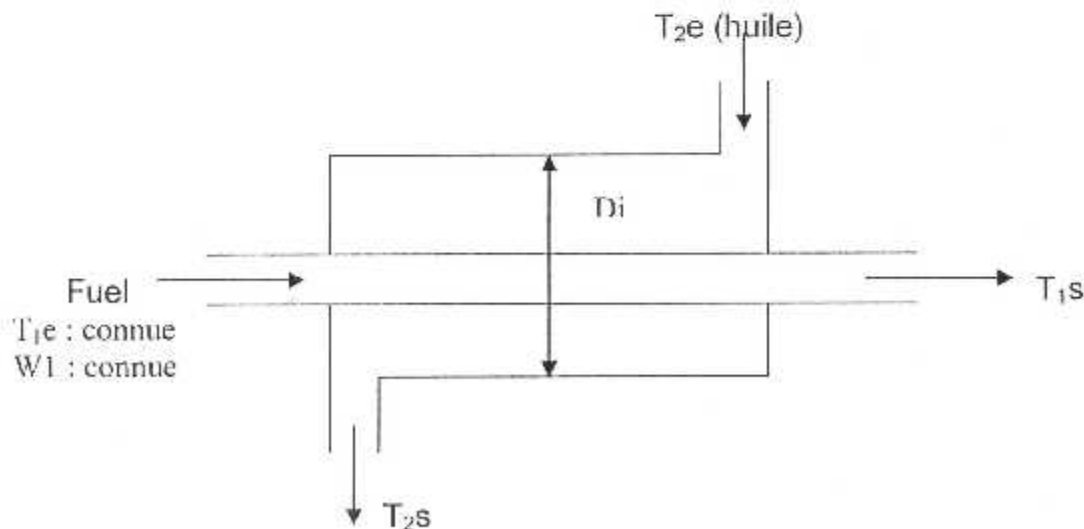
II-3-1/- Introduction :

Un échangeur de chaleur est un appareil destiné à échanger de la chaleur entre deux fluides à travers une paroi .

$$\phi = K.S.\Delta T_{ml} \tag{II-5}$$

Pour Sa Conception :

- nécessité de la connaissance des 4 températures, si on ne connaît que les températures d'entrée alors on ne peut pas calculer le flux échangé avec cette formule. on utilise une méthode de prédiction correction (II-5).
- On se donne les température de sortie:
- On peut calculer le ΔT_{ml} .
- On peut calculer le flux par (II-5) .
- $\Phi = m_c C p_c (T_{ce} - T_{cs})$
 $\Phi = m_f C p_f (T_{fs} - T_{fe})$
 Ce flux permet de déterminer des nouvelles valeurs de températures de sortie (T_{cs} et T_{fs}).
- Si elles sont les mêmes, si non on va refaire les mêmes calculs avec Les (T_{cs} et T_{fs}) trouvés (on calcul ΔT_{ml}).



$$\Delta T = \frac{(T_2^s - T_1^s) - (T_2^e - T_1^e)}{L \ln \left(\frac{T_2^s - T_1^e}{T_2^e - T_1^s} \right)}$$

$$Q = U \cdot S_r (T_e - T_i)$$

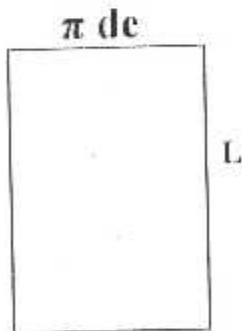
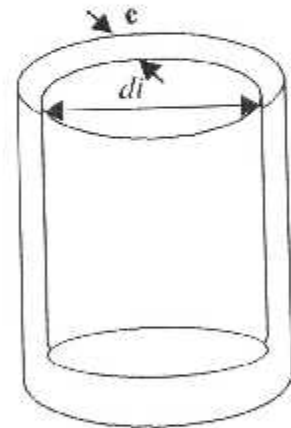
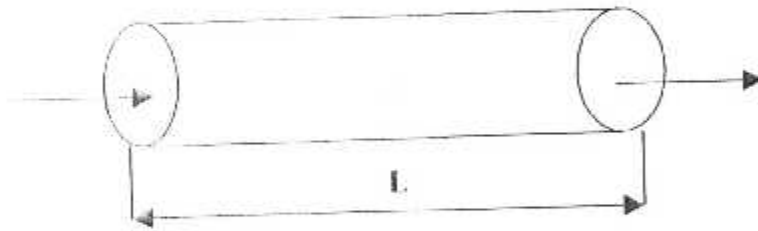
$$1/u = R1 + R2 + R3$$

(II-6)

- R1 : convection à l'intérieur du tube.
- R2 : conduction.
- R3 : convection à l'extérieur du tube.

II-3-2/- surfaces de référence :

En général, on prend la surface extérieur du tube comme surface de référence .



$$de = di + 2e$$

$$A = \pi(di + 2e) L$$

- A : surface de référence
- Di : diamètre intérieur du tube
- e : épaisseur
- L : la longueur

$$R_1 = \frac{1}{h_1} \frac{A_1}{A} \quad \left. \begin{array}{l} \text{convection à l'intérieur} \\ \text{du tube.} \end{array} \right\}$$

$$R_2 = \frac{1}{h_2} \quad \text{convection à l'extérieur du tube .}$$

h_1 : coefficient local d'échange (fluide froid-paroi)
 h_2 : coefficient local d'échange (fluide chaud-paroi) .

$$Rm = \frac{e}{\lambda} \frac{A_m}{A}$$

Avec :

$$A_m = \pi(d_1+e).L$$

λ : coefficient de conductivité thermique

e : l'épaisseur

L'équation (II-6) s'écrit :

$$\boxed{\frac{1}{U} = \frac{1}{h_1} \frac{d_1}{d_1+2e} + \frac{e}{\lambda} \frac{1}{d_1+2e} + \frac{1}{h_2}} \quad (II-7)$$

- Pour l'écoulement turbulent à l'intérieur du tube ($Re > 10\,000$) :

On utilise la corrélation suivante :

$$Nu = 0,023 Re^{0,8} Pr^{\frac{1}{3}}$$

Avec : les nombres addimensionnels suivants :

Nombre de Nusselt : $Nu = \frac{h d_1}{\lambda}$

Nombre de Prandtl : $Pr = \frac{\mu C_p}{\rho v}$

Nombre de Reynolds : $Re = \frac{\rho v_1 d_1}{\mu}$

- ρ_1 : la masse volumique (fuel).
 v_1 : vitesse (fuel).
 μ_1 : viscosité dynamique (fuel).
 C_{p1} : chaleur spécifique à pression constante (fuel).
 h_1 : coefficient local d'échange (fuel).
 d_i : diamètre intérieur du tube.
 λ : coefficient de conductivité thermique.

D'où :

$$\frac{h_1 d_i}{\lambda_1} = 0,023 \left(\frac{d_i v_1 \rho_1}{\mu_1} \right)^{0,8} \left(\frac{C_{p1} \mu_1}{\lambda_1} \right)^{1/3} \quad (\text{II-8})$$

- Pour l'écoulement turbulent à l'extérieur du tube :

On utilise la corrélation suivante :

$$Nu = 0,023 Re^{0,8} Pr^{1/3} \left(\frac{Di}{di + 2e} \right)^{0,53}$$

Avec les nombres dimensionnels suivants :

Nombre de Nusselt : $Nu = \frac{h_2 Deq}{\lambda}$

Nombre de Prandtl : $Pr = \frac{\mu_2 C_{p2}}{\rho_2}$

Nombre de Reynolds : $Re = \frac{\rho_2 v_2 Deq}{\mu_2}$

Avec :

$$Deq = \frac{Di - (di + 2e)^2}{di + 2e}$$

- ρ_2 : la masse volumique (huile).
 v_2 : vitesse (huile).
 μ_2 : viscosité dynamique (huile).
 C_{p2} : chaleur spécifique à pression constante (huile).
 h_2 : coefficient local d'échange (huile).
 D_i : diamètre intérieur de l'espace enveloppe.
 λ : coefficient de conductivité thermique.
 e : l'épaisseur du tube intérieur.
 d_i : diamètre intérieur du tube.

D'où :

$$\frac{h_v Deq}{\lambda} = 0.023 \left(\frac{\rho_2 v_2 Deq}{\mu_2} \right)^{0.8} \left(\frac{\mu_2 C p_2}{\rho_2} \right)^{1/4} \left(\frac{Di}{d_i + 2e} \right)^{0.53} \quad (II-9)$$

II-4/- ETUDE DES PERTES DE CHARGE DANS UN ECHANGEUR :

II-4-1/- Introduction :

Plus le nombre de Reynolds est important, plus le transfert de chaleur est important de même pour les pertes de charge, le problème est de trouver une solution optimale.

Cette partie sera consacrée à l'étude des pertes de charge.

II-4-2/-Perte de charge à l'intérieur du tube :

L'équation de pertes de charge linéaires s'écrit :

$$\Delta P = \lambda \cdot \frac{L}{di} \cdot \frac{\rho v^2}{2} \quad (II-10)$$

Avec :

- λ : coefficient de perte de charge
- di : diamètre intérieur de la conduite
- v : vitesse moyenne
- L : longueur de la conduite

II-4-3/- Relations empiriques adoptées pour le coefficient de pertes de charge linéaires λ :

- En Régime laminaire :

$$Re < 2100$$

$$\lambda = \frac{64}{Re}$$

- En Régime turbulent :

L'effet de rugosité intervient et le coefficient λ sera :

- Pour les tubes lisses :

$$\lambda = 0.0056 + 0.5 Re^{-0.32}$$

- Pour les tubes rugueux :

$$\lambda = 0.014 + 1.56 Re^{-0.42}$$

Si les propriétés thermo-physiques varient alors les viscosités varient ce qui s'en suit pour la perte de charge et on introduit un coefficient correctif :

$$\Delta P = \lambda \cdot \frac{L}{di} \cdot \frac{\rho v^2}{2} \left(\frac{1}{\phi} \right) \quad (\text{II-11})$$

$$\text{où } \phi = \left(\frac{\mu}{\mu_p} \right)^{0.14}$$

CHAPITRE III

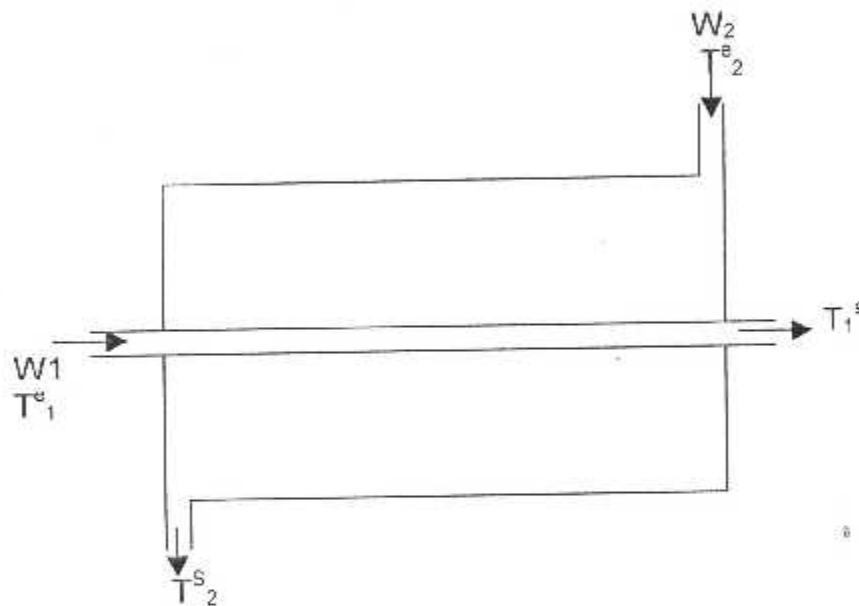
METHODE DE CONCEPTION DE L'ECHANGEUR

III-1/ - DEFINITION DU PROBLEME :

Un courant de fuel (kérosène) doit être chauffé de $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$ à $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ à l'aide de l'huile chaude provenant des paliers disponibles et des boîtes d'entraînement.

On se propose de concevoir l'échangeur de chaleur réalisant cette opération.

Le type de l'échangeur choisi est le plus simple, Un échangeur à contre courant pur, le fuel circulant dans le tube intérieur.



Avec :

W : débit massique Kg/s

T^e : température d'entrée en K°

T^s : température de sortie en K°

Les indices 1 et 2 références respectivement les propriétés relatives au fluide circulant à l'intérieur du tube (fuel) et à celui circulant dans l'espace enveloppe (l'huile).

III-2/- MODELISATION DU PROBLEME :**III-2-1/- Etablissement des équations :**

La formulation des diverses équations du modèle repose sur plusieurs hypothèses :

- Il n'y a ni pertes thermiques, ni changement de phases au cours du transfert
- Les propriétés physico-chimiques des deux fluides sont constantes au sein de l'échangeur.
- Le coefficient global de transfert U est constant en tout point.
- L'écoulement des deux fluides est turbulent.

Le bilan thermique effectué entre l'entrée et la sortie de l'échangeur permet d'exprimer la quantité de chaleur Q récupérée par le fluide froid.

$$Q = W_1 \cdot C_{p1} (T_1^S - T_1^e) \quad (\text{III-1})$$

Q représente aussi la quantité de chaleur perdue par le fluide chaud.

$$Q = W_2 \cdot C_{p2} (T_2^e - T_2^S) \quad (\text{III-2})$$

Le C_p est exprimée en J/kg K .

La quantité de chaleur échangée est par ailleurs, fonction des températures et de la géométrie de l'échangeur.

$$Q = U \cdot A \cdot \Delta T_{ml} \quad (\text{III-3})$$

Avec :

- A : surface totale d'échange en (m^2)
- U : coefficient d'échange global en ($\text{W/m}^2\text{k}$)

Dans le cas d'un échangeur à contre-courant :

$$\Delta T_{ml} = \frac{(T_2^e - T_1^e) - (T_2^S - T_1^S)}{\ln \left(\frac{T_2^e - T_1^S}{T_2^S - T_1^e} \right)}$$

Le coefficient d'échange global en fonction des diverses résistances au transfert :

$$\frac{1}{U} = R_1 + R_2 + R_m$$

- R_1 : résistance dans le fluide à l'intérieur du tube ($\text{m}^2\text{k/W}$) .
- R_2 : résistance dans le fluide à l'extérieur du tube ($\text{m}^2\text{k/W}$) .
- R_m : résistance due à la paroi métallique du tube ($\text{m}^2\text{k/W}$) .

Les résistances sont exprimées en ($\text{m}^2\text{k/W}$) , il est convenable de les rapporter à la même surface .

La surface de référence choisie est la surface extérieur du tube.

$$A = \pi \cdot (d_i + 2e) \cdot L$$

(III-4)

d_i : diamètre intérieur du tube (m).
 e : épaisseur du tube (m).
 L : longueur du tube (m).

Les résistances s'expriment par :

$$R_1 = \frac{1}{h_1 \frac{A_i}{A}}$$

$$R_2 = \frac{1}{h_2 \frac{A}{A_i}} = \frac{1}{h_2}$$

$$R_m = \frac{e}{\lambda \frac{A_m}{A}}$$

h_1 : coefficient local d'échange fluide froid-paroi (w/m^2k).
 h_2 : coefficient local d'échange fluide paroi-fluide chaude (w/m^2k).
 λ : conductivité thermique du métal (w/mk).
 A_i : surface intérieur du tube.
 $A_i = \pi d_i L$
 A_m : surface moyenne du tube.
 $A_m = \pi(d_i + e) L$

D'où la relation :

$$\frac{1}{U} = \frac{1}{h_1 \frac{d_i}{d_i + 2e}} + \frac{e}{\lambda(d_i + e)} + \frac{1}{h_2}$$

(III-5)

Le calcul des coefficients locaux d'échange dépend de la nature de l'écoulement : (laminaire, turbulent, ou transition)

Dans l'hypothèse d'un écoulement turbulent ($Re > 10\,000$), les relations sont les suivantes :

- Pour l'écoulement à l'intérieur du tube :

La corrélation utilisée est celle de **SIEDER-TATE**

Nu : nombre de Nusselt $Nu = \frac{hd_i}{k}$

Re : nombre de Reynolds $Re = \frac{dv\rho}{\mu}$

Pr : nombre de Prandtl $Pr = \frac{\mu.C_p}{k}$

Avec :

v : vitesse du liquide (m/s).

ρ : masse volumique du liquide (kg/m³).

μ : viscosité dynamique du liquide (poiseuille).

k : conductivité thermique du liquide (w/mk).

C_p : capacité calorifique du liquide (J/kg k).

μ_p : viscosité du liquide à la température de la paroi (Poiseuille).

Le terme $\left(\frac{\mu}{\mu_p}\right)^{0.14}$ est une correction destinée à tenir compte des effets de la variation de la température sur la viscosité du fluide, ce terme peut-être négligé car la différence : température liquide froid-température liquide chaud n'étant pas trop élevée

D'où :

$$\frac{hd_i}{k_i} = 0.023 \left(\frac{dv\rho_i}{\mu_i}\right)^{0.8} \left(\frac{C_{p,i}\mu_i}{k_i}\right)^{1/3} \quad (III-6)$$

- Pour l'écoulement à l'extérieur du tube :

la corrélation utilisée est celle de **MONRAD** et **PELTON**.

$$Nu_e = \frac{hD_{eq}}{k} = 0.023 Re_{eq}^{0.8} Pr_e^{1/3} \left(\frac{D_i}{d_i + 2e}\right)^{1/3}$$

Avec :

D_i : diamètre intérieur de l'espace enveloppe (m).

D_{eq} : diamètre équivalent (m).

$$D_{eq} = \frac{D_i - (d_i + 2e)^2}{d_i + 2e}$$

Re_{eq} : Reynolds équivalent .

$$Re_{eq} = \frac{D_{eq}v\rho}{\mu}$$

D'ou :

$$\frac{h_2 D_{eq}}{k_2} = 0.02 \left(\frac{D_{eq} v_2 \rho_2}{\mu_2} \right)^{0.8} \left(\frac{C p_2 \mu_2}{k_2} \right)^{1/3} \left(\frac{D}{d_i + 2e} \right)^{0.53} \quad (\text{III-7})$$

III-3/-CALCUL DES PERTES DE CHARGE :

Dans notre conception, on ne tient compte que des pertes de charge linéaires.

L'équation des pertes de charge s'écrit :

$$\Delta P = \frac{1}{2} f \frac{L}{r_h} \rho v^2$$

r_h : rayon hydraulique (m).

f : Facteur de friction .

ΔP : perte de charge (Pa).

ρ : masse volumique du liquide (kg/m^3)

v : vitesse du liquide (m/s)

En régime turbulent, le coefficient de friction est donné par la relation empirique suivante :

$$f = 0.0014 + 0.125 R_e^{-0.32}$$

Pertes de charge à l'intérieur du tube :

Le rayon hydraulique est :

$$r_h = \frac{d_i}{4}$$

d'ou :

$$\Delta P = 2 f_i \frac{L}{d_i} \rho v_1^2 \quad (\text{III-8})$$

Avec :

$$f_i = 0.0014 + 0.125 \left(\frac{d_i v_1 \rho_1}{\mu_1} \right)^{-0.32}$$

d_i : diamètre intérieur du tube (m)

ρ_1 : masse volumique du liquide froid (kg/m^3)

v_1 : vitesse du liquide froid (m/s)

μ_1 : viscosité dynamique du liquide froid (poiseuille)

Pertes de charge à l'extérieur du tube :

Le rayon hydraulique r_H est donné par :

$$r_H = \frac{D_i - d_i}{4}$$

d'où :

$$\Delta P_2 = 2f_2 \frac{l}{D_i - d_i} \rho_2 v_2^2$$

(III-9)

Avec :

$$f_2 = 0,0014 + 0,125 \left[\frac{(D_i - d_i) v_2 \rho_2}{\mu_2} \right]^{0,32}$$

D_i : diamètre intérieur de l'espace enveloppe (m)

d_i : diamètre intérieur du tube (m)

ρ_2 : masse volumique du liquide chaud (kg/m^3)

μ_2 : viscosité dynamique du liquide chaud (poiseuille)

v_2 : vitesse du liquide chaud (m/s)

III-4/- Analyse des équations :

Les propriétés physico-chimiques des deux liquides et du métal étant connues, l'analyse de ces neuf équations fournit les 13 variables :

$Q, W_2, T_2^S, U, A, h_1, h_2, D_i, d_i, L, \Delta P, \Delta P_2, e.$

L'épaisseur du métal est imposée par la pression à l'intérieur du tube (les tubes ont des épaisseurs standards).

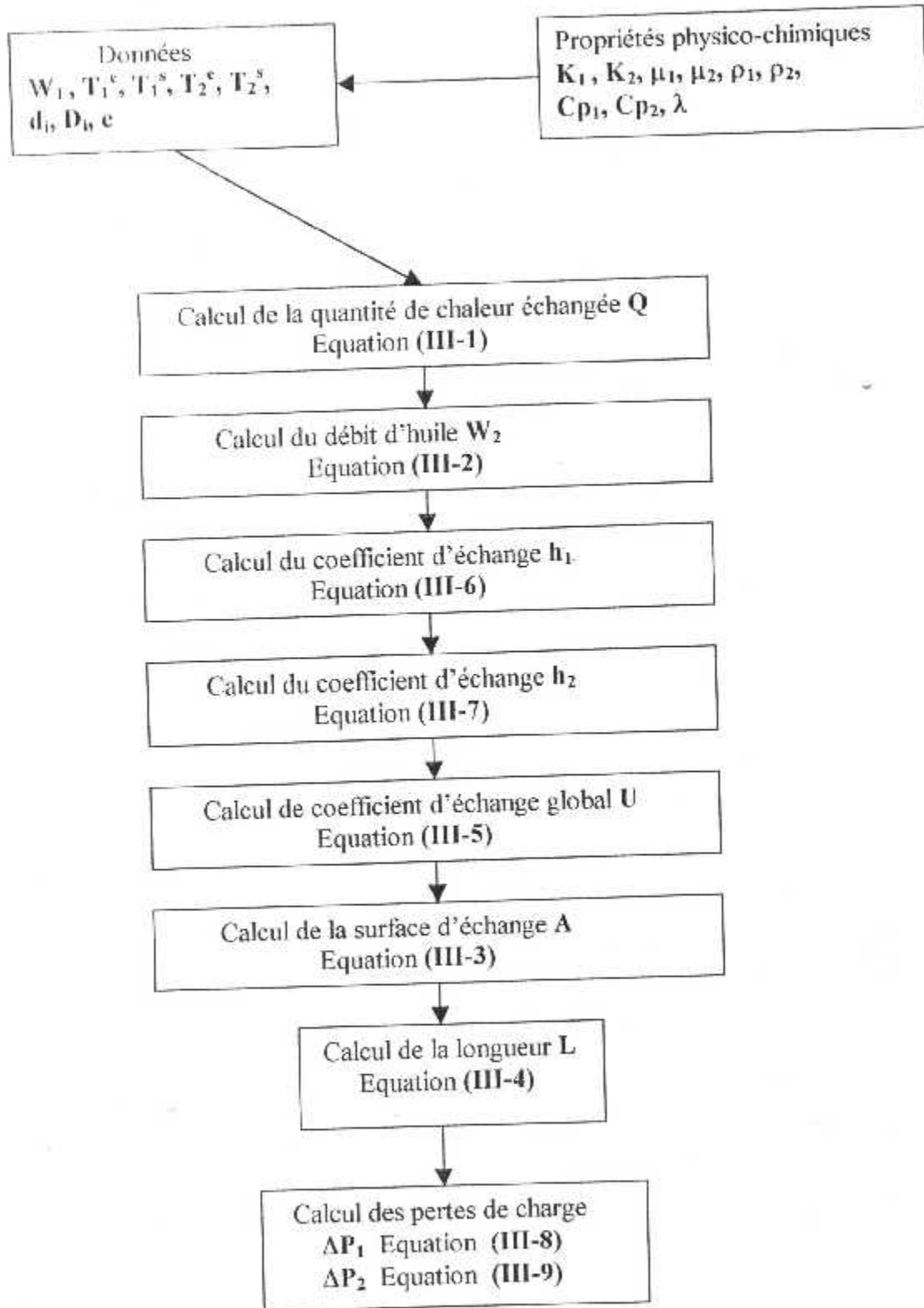
Il reste donc pour le dimensionnement de l'échangeur trois (03) variables qui déterminent la conception de l'échangeur :

- Diamètre intérieur du tube fuel (d_i)
- Diamètre intérieur de l'espace enveloppe (D_i)
- Température de sortie de l'huile (T_2^S)

Pour pouvoir arriver à une conception de l'échangeur, nous aurons à manipuler les 13 variables contenues dans les neuf équations précédentes.

Pour cela nous avons établi l'organigramme suivant :

III-5/-ORGANIGRAMME DU CALCUL DE L'ECHANGEUR :



CHAPITRE IV

DIMENSIONNEMENT ET CALCUL
(RESULTATS)

IV-1/- Introduction :

Après avoir écrit un programme en langage Fortran 77 permettant de traduire l'organigramme du dimensionnement de l'échangeur, on manipule plusieurs paramètres pour générer des conceptions.

Le choix d'une meilleure conception repose sur plusieurs critères :

- poids minimum
- pertes de charge minimales (vitesses minimales).

IV-2/- Résultats :

On présente dans les tableaux ci-dessous, les résultats donnés par le programme pour plusieurs cas.

Les températures entrée et sortie des deux fluides sont imposés.

On ne fait varier que les températures d'entrée des deux fluides pour les cas qui suivent.

Les températures de sortie des deux fluides sont imposées constants.

IV-2-1/-Débit massique $w_1=0,400$ kg/s**IV-2-1-1/- 1^{er} Cas :**

Température d'entrée fluide froid (T_e^1) = 253.15 k
Température de sortie fluide froid (T_s^1) = 320 k
Température d'entrée fluide chaud (T_e^2) = 403.15 k
Température de sortie fluide chaud (T_s^2) = 393.15 k

IV-2-1-1-1/- Variation du diamètre intérieur du tube enveloppe :

On impose le diamètre intérieur du tube froid avec son épaisseur et on fait varier le diamètre intérieur du tube chaud .

Diamètre intérieur du tube froid (d_i) = 0.012 m
Épaisseur du tube (e) = 0.003 m

- Pour diamètre intérieur du tube chaud (d_e) = 0.08 m

	Cote tube (1)	Cote tube (2)
Débit w (kg/s)	0,400	1,308
Pr	0,002	0,018
Re	32000,991	10050
Vitesse v (m/s)	4,564	0,011
C.L.E h (w/m ² k)	8627,706	16,802
ΔP (Pa)	7769,604	0,047

$$U=16,75031 \text{ w/m}^2\text{k}$$

$$A=0,027583298 \text{ m}^2$$

$$L=0,48777979\text{m}$$

- Pour diamètre intérieur du tube chaud (d_e) = 0.1m

	Cote tube (1)	Cote tube (2)
Débit w (kg/s)	0,400	1,308
Pr	0,002	0,018
Re	32000,991	10050
Vitesse v (m/s)	4,564	0,009
C.L.E h (w/m ² k)	8627,706	15,117
ΔP (Pa)	8633,086	0,025

$$U=15,0749477 \text{ w/m}^2\text{k}$$

$$A=0,030648788 \text{ m}^2$$

$$L=0,54198956\text{m}$$

- Pour diamètre intérieur du tube chaud (d_e) = 0.12m

	Cote tube (1)	Cote tube (2)
Débit w (kg/s)	0,400	1,308
Pr	0,002	0,018
Re	32000,991	10050
Vitesse v (m/s)	4,564	0,007
C.L.E h (w/m ² k)	8627,706	13,868
ΔP (Pa)	9408,436	0,016

$$U=13,832618 \text{ w/m}^2\text{k}$$

$$A=0,033401402 \text{ m}^2$$

$$L=0,59066647 \text{ m}$$

IV-2-1-1-2/- Variation du diamètre intérieur du tube intérieur :

On impose le diamètre intérieur du tube chaud et on fixe l'épaisseur du tube froid et on fait varier le diamètre intérieur du tube froid :

Diamètre intérieur du tube chaud (d_a) = 0.08 m
 Epaisseur du tube (e) = 0.003 m

- Pour diamètre intérieur du tube froid (d_i) = 0.008 m

	Cote tube (1)	Cote tube (2)
Débit w (kg/s)	0,400	1,308
Pr	0,002	0,018
Re	48001,489	10050
Vitesse v (m/s)	10,268	0,009
C.L.E h (w/m ² k)	17900,273	14,906
ΔP (Pa)	77447,086	0,041

$U=14,882162$ w/m²k
 $A=0,031045812$ m²
 $L=0,70587062$ m

- Pour diamètre intérieur du tube froid (d_i) = 0.01 m

	Cote tube (1)	Cote tube (2)
Débit w (kg/s)	0,400	1,308
Pr	0,002	0,018
Re	38401,192	10050
Vitesse v (m/s)	6,572	0,010
C.L.E h (w/m ² k)	11979,035	15,883
ΔP (Pa)	21994,243	0,044

$U=15,847441$ w/m²k
 $A=0,029154789$ m²
 $L=0,58001613$ m

- Pour diamètre intérieur du tube froid (d_i) = 0.012 m

	Cote tube (1)	Cote tube (2)
Débit w (kg/s)	0,400	1,308
Pr	0,02	0,018
Re	32000,991	10050
Vitesse v (m/s)	4,564	0,011
C.L.E h (w/m ² k)	8627,706	16,802
ΔP (Pa)	7769,604	0,047

$$U=16,75031 \text{ w/m}^2\text{k}$$

$$A=0,027583298 \text{ m}^2$$

$$L=0,48777979 \text{ m}$$

IV-2-1-2/- 2^{ém} Cas :

Température d'entrée fluide froid (T_e^1) = 253.15 k
 Température de sortie fluide froid (T_s^1) = 320 k
 Température d'entrée fluide chaud (T_e^2) = 413.15 k
 Température de sortie fluide chaud (T_s^2) = 393.15 k

IV-2-1-2-1/- Variation du diamètre intérieur du tube enveloppe :

On impose le diamètre intérieur du tube froid avec son épaisseur et on fait varier le diamètre intérieur du tube chaud .

Diamètre intérieur du tube froid (d_i) = 0.012 m
 Epaisseur du tube (e) = 0.003 m

- Pour diamètre intérieur du tube chaud (d_e) = 0.08 m

	Cote tube (1)	Cote tube (2)
Débit w (kg/s)	0,400	0,654
Pr	0,002	0,018
Re	32000,991	10050,000
Vitesse v (m/s)	4,564	0,011
C.L.E h (w/m ² k)	8627,706	16,802
ΔP (Pa)	7372,921	0,045

$$U=16,75031 \text{ w/m}^2\text{k}$$

$$A=0,026175016 \text{ m}^2$$

$$L=0,4628759 \text{ m}$$

- Pour diamètre intérieur du tube chaud (d_e) = 0.1m

	Cote tube (1)	Cote tube (2)
Débit w (kg/s)	0,400	0,654
Pr	0,002	0,018
Re	32000,991	10050,000
Vitesse v (m/s)	4,564	0,009
C.L.E h (w/m ² k)	8627,706	15,117
ΔP (Pa)	8192,317	0,024

$$U=15,074947 \text{ w/m}^2\text{k}$$

$$A=0,029083997 \text{ m}^2$$

$$L=0,511431792 \text{ m}$$

- Pour diamètre intérieur du tube chaud (d_e) = 0.12m

	Cote tube (1)	Cote tube (2)
Débit w (kg/s)	0,400	0,654
Pr	0,002	0,018
Re	32000,991	10050
Vitesse v (m/s)	4,564	0,007
C.L.E h (w/m ² k)	8627,706	13,686
ΔP (Pa)	8928,083	0,015

$$U=13,832618 \text{ w/m}^2\text{k}$$

$$A=0,031696075 \text{ m}^2$$

$$L=0,56050962 \text{ m}$$

IV-2-1-2-2/- Variation du diamètre intérieur du tube intérieur :

On impose le diamètre intérieur du tube chaud et on fixe l'épaisseur du tube froid et on fait varier le diamètre intérieur du tube froid .

Diamètre intérieur du tube chaud (d_a) = 0.08 m
 Epaisseur du tube (e) = 0.003 m

- Pour diamètre intérieur du tube froid (d_i) = 0.008 m

	Cote tube (1)	Cote tube (2)
Débit w (kg/s)	0,400	0,654
Pr	0,002	0,018
Re	48001,489	10050
Vitesse v (m/s)	10,268	0,009
C.L.E h (w/m^2k)	179000,273	14,906
ΔP (Pa)	73492,974	0,039

$$U=14,882162 \text{ w/m}^2\text{k}$$

$$A=0,029460749 \text{ m}^2$$

$$L=0,66983193 \text{ m}$$

- Pour diamètre intérieur du tube froid (d_i) = 0.01 m

	Cote tube (1)	Cote tube (2)
Débit w (kg/s)	0,400	0,654
Pr	0,002	0,018
Re	38401,192	10050
Vitesse v (m/s)	6,572	0,010
C.L.E h (w/m^2k)	11979,035	15,883
ΔP (Pa)	20871,314	0,042

$$U=15,847441 \text{ w/m}^2\text{k}$$

$$A=0,027666276 \text{ m}^2$$

$$L=0,55040305 \text{ m}$$

- Pour diamètre intérieur du tube froid (d_i) = 0.012 m

	Cote tube (1)	Cote tube (2)
Débit w (kg/s)	0,400	0,654
Pr	0,002	0,018
Re	32000,991	10050
Vitesse v (m/s)	4,564	0,011
C.L.E h (w/m ² k)	8627,706	16,802
ΔP (Pa)	7372,921	0,045

$$U=16,590270 \text{ w/m}^2\text{k}$$

$$A=0,026175016 \text{ m}^2$$

$$L=0,4628759 \text{ m}$$

IV-2-1-3/- 3^{em} Cas :

Température d'entrée fluide froid (T_e^1) = 263.15 k
 Température de sortie fluide froid (T_s^1) = 320 k
 Température d'entrée fluide chaud (T_e^2) = 403.15 k
 Température de sortie fluide chaud (T_s^2) = 393.15 k

IV-2-1-3-1/- Variation du diamètre intérieur du tube enveloppe :

Diamètre intérieur du tube froid (d_i) = 0.012 m
 Epaisseur du tube (e) = 0.003 m

- Pour diamètre intérieur du tube chaud (d_e) = 0.08 m

	Cote tube (1)	Cote tube (2)
Débit w (kg/s)	0,400	1,112
Pr	0,002	0,018
Re	32000,991	10050
Vitesse v (m/s)	4,564	0,011
C.L.E h (w/m ² k)	8627,706	17,802
ΔP (Pa)	6877,225	0,042

$$U=16,750310 \text{ w/m}^2\text{k}$$

$$A=0,024415215 \text{ m}^2$$

$$L=0,43175578 \text{ m}$$

- Pour diamètre intérieur du tube chaud (d_e) = 0.1m

	Cote tube (1)	Cote tube (2)
Débit w (kg/s)	0,400	1,112
Pr	0,002	0,018
Re	32000,991	10050
Vitesse v (m/s)	4,564	0,009
C.L.E h (w/m^2k)	8627,706	15,117
ΔP (Pa)	7641,53	0,023

$$U=15,074947 \text{ w/m}^2\text{k}$$

$$A=0,027128618 \text{ m}^2$$

$$L=0,4793927 \text{ m}$$

- Pour diamètre intérieur du tube chaud (d_e) = 0.12m

	Cote tube (1)	Cote tube (2)
Débit w (kg/s)	0,400	1,112
Pr	0,002	0,018
Re	32000,991	10050
Vitesse v (m/s)	4,564	0,007
C.L.E h (w/m^2k)	8627,706	13,868
ΔP (Pa)	8327,829	0,014

$$U=13,832618 \text{ w/m}^2\text{k}$$

$$A=0,02956081 \text{ m}^2$$

$$L=0,52282541 \text{ m}$$

IV-2-1-3-2/- Variation du diamètre intérieur du tube intérieur :

Diamètre intérieur du tube chaud (d_e) = 0.08 m
 Epaisseur du tube (e) = 0.003 m

- Pour diamètre intérieur du tube froid (d_i) = 0.008 m

	Cote tube (1)	Cote tube (2)
Débit w (kg/s)	0,400	1,112
Pr	0,002	0,018
Re	48001,489	10050
Vitesse v (m/s)	10,268	0,009
C.L.E h (w/m^2k)	17900,273	14,906
ΔP (Pa)	68551,898	0,036

$U=14,882162 w/m^2k$
 $A=0,02740041 m^2$
 $L=0,62479776 m$

- Pour diamètre intérieur du tube froid (d_i) = 0.01 m

	Cote tube (1)	Cote tube (2)
Débit w (kg/s)	0,400	1,112
Pr	0,002	0,018
Re	38401,192	10050
Vitesse v (m/s)	6,572	0,010
C.L.E h (w/m^2k)	11979,035	15,883
ΔP (Pa)	19468,091	0,039

$U=15,847441 w/m^2k$
 $A=0,025806212 m^2$
 $L=0,51339828 m$

- Pour diamètre intérieur du tube froid (d_i) = 0.012 m

	Cote tube (1)	Cote tube (2)
Débit w (kg/s)	0,400	1,112
Pr	0,002	0,018
Re	32000,991	10050
Vitesse v (m/s)	4,564	0,011
C.L.E h (w/m^2k)	8627,706	16,802
ΔP (Pa)	6877,225	0,042

$U=16,750310 w/m^2k$
 $A=0,024415215 m^2$
 $L=0,43175578 m$

IV-2-1-4/- 4^{em} Cas :

Température d'entrée fluide froid (T_e^1) = 263.15 k
 Température de sortie fluide froid (T_s^1) = 320 k
 Température d'entrée fluide chaud (T_e^2) = 413.15 k
 Température de sortie fluide chaud (T_s^2) = 393.15 k

IV-2-1-4-1/- Variation du diamètre intérieur du tube enveloppe :

Diamètre intérieur du tube froid (d_i) = 0.012 m
 Epaisseur du tube (e) = 0.003 m

- Pour diamètre intérieur du tube chaud (d_e) = 0.08 m

	Cote tube (1)	Cote tube (2)
Débit w (kg/s)	0,400	0,556
Pr	0,002	0,018
Re	32000,991	10050
Vitesse v (m/s)	4,564	0,011
C.L.E h (w/m^2k)	8627706	16,802
ΔP (Pa)	6521,569	0,039

$U=16,750310 w/m^2k$
 $A=0,023152182 m^2$
 $L=0,49942755 m$

- Pour diamètre intérieur du tube chaud (d_e) = 0.1m

	Cote tube (1)	Cote tube (2)
Débit w (kg/s)	0,400	0,556
Pr	0,002	0,018
Re	32000,991	10050
Vitesse v (m/s)	4,564	0,009
C.L.E h (w/m^2k)	8627706	15,117
ΔP (Pa)	7246,349	0,021

$U=15,074947 w/m^2k$
 $A=0,025725662 m^2$
 $L=0,045492959 m$

- Pour diamètre intérieur du tube chaud (d_e) = 0.12m

	Cote tube (1)	Cote tube (2)
Débit w (kg/s)	0,400	0,556
Pr	0,002	0,018
Re	32000,991	10050
Vitesse v (m/s)	4,564	0,007
C.L.E h (w/m^2k)	8627,706	13,868
ΔP (Pa)	7897,155	0,013

$$U=13,032618 \text{ w/m}^2\text{k}$$

$$A=0,028036123 \text{ m}^2$$

$$L=0,49578753 \text{ m}$$

IV-2-1-4-2/- Variation du diamètre intérieur du tube intérieur :

Diamètre intérieur du tube chaud (d_s) = 0.08 m
 Epaisseur du tube (e) = 0.003 m

- Pour diamètre intérieur du tube froid (d_i) = 0.008 m

	Cote tube (1)	Cote tube (2)
Débit w (kg/s)	0,400	0,556
Pr	0,002	0,018
Re	48001,489	10050
Vitesse v (m/s)	10,268	0,009
C.L.E h (w/m^2k)	17900,273	14,906
ΔP (Pa)	65006,726	0,034

$$U=14,882162 \text{ w/m}^2\text{k}$$

$$A=0,026058912 \text{ m}^2$$

$$L=0,59248632 \text{ m}$$

- Pour diamètre intérieur du tube froid (d_i) = 0.01 m

	Cote tube (1)	Cote tube (2)
Débit w (kg/s)	0,400	0,556
Pr	0,002	0,018
Re	38401,192	10050
Vitesse v (m/s)	6,572	0,010
C.L.E h (w/m^2k)	11979,035	15,883
ΔP (Pa)	18461,3	0,037

$$U=15,847441 \text{ w/m}^2\text{k}$$

$$A=0,02447164 \text{ m}^2$$

$$L=0,4864793 \text{ m}$$

- Pour diamètre intérieur du tube froid (d_i) = 0.012 m

	Cote tube (1)	Cote tube (2)
Débit w (kg/s)	0,400	0,556
Pr	0,002	0,018
Re	32000,991	10050
Vitesse v (m/s)	4,564	0,011
C.L.E h (w/m^2k)	8627,706	16,802
ΔP (Pa)	6521,569	0,039

$$U=16,750310 \text{ w/m}^2\text{k}$$

$$A=0,023152582 \text{ m}^2$$

$$L=0,40942755 \text{ m}$$

IV-2-2/-Débit massique $w_1=0,5\text{kg/s}$

IV-2-2-1/- 1^{er} Cas :

Température d'entrée fluide froid (T_e^1) = 253.15 k
 Température de sortie fluide froid (T_s^1) = 320 k
 Température d'entrée fluide chaud (T_e^2) = 403.15 k
 Température de sortie fluide chaud (T_s^2) = 393.15 k

IV-2-2-1-1/- Variation du diamètre intérieur du tube enveloppe :

Diamètre intérieur du tube froid (d_i) = 0.012 m
 Epaisseur du tube (e) = 0.003 m

- Pour diamètre intérieur du tube chaud (d_e) = 0.08 m

	Cote tube (1)	Cote tube (2)
Débit w (kg/s)	0,500	1,635
Pr	0,002	0,018
Re	40001,237	10050
Vitesse v (m/s)	5,704	0,011
C.L.E h (w/m^2k)	10313,917	16,802
ΔP (Pa)	14369,624	0,059

$$U=16,758289 \text{ w/m}^2\text{k}$$

$$A=0,034462708 \text{ m}^2$$

$$L=0,60943448 \text{ m}$$

- Pour diamètre intérieur du tube chaud (d_e) = 0.1m

	Cote tube (1)	Cote tube (2)
Débit w (kg/s)	0,500	1,635
Pr	0,002	0,018
Re	40001,237	10050
Vitesse v (m/s)	5,704	0,009
C.L.E h (w/m^2k)	10313,917	15,117
ΔP (Pa)	15967,363	0,032

$$U=15,081408 \text{ w/m}^2\text{k}$$

$$A=0,038294571 \text{ m}^2$$

$$L=0,67719668 \text{ m}$$

- Pour diamètre intérieur du tube chaud (d_e) = 0.12m

	Cote tube (1)	Cote tube (2)
Débit w (kg/s)	0,500	1,635
Pr	0,002	0,018
Re	40001,237	10050
Vitesse v (m/s)	5,704	0,009
C.L.E h (w/m^2k)	10313,917	13,868
ΔP (Pa)	17402,03	0,019

$$U=13,838058 \text{ w/m}^2\text{k}$$

$$A=0,041735339 \text{ m}^2$$

$$L=0,73804283 \text{ m}$$

IV-2-2-1-2/- Variation du diamètre intérieur du tube intérieur :

Diamètre intérieur du tube chaud (d_e) = 0.08 mÉpaisseur du tube (e) = 0.003 m- Pour diamètre intérieur du tube froid (d_i) = 0.008 m

	Cote tube (1)	Cote tube (2)
Débit w (kg/s)	0,500	1,635
Pr	0,002	0,018
Re	60001,862	10050
Vitesse v (m/s)	12,835	0,009
C.L.E h (w/m^2k)	21398,705	14,906
ΔP (Pa)	143522,396	0,051

 $U=14,885704 w/m^2k$ $A=0,03878034 m^2$ $L=0,88212835 m$ - Pour diamètre intérieur du tube froid (d_i) = 0.01 m

	Cote tube (1)	Cote tube (2)
Débit w (kg/s)	0,500	1,635
Pr	0,002	0,018
Re	48001,489	10050
Vitesse v (m/s)	58,214	0,010
C.L.E h (w/m^2k)	14320,22	15,883
ΔP (Pa)	40714,576	0,055

 $U=15,852925 w/m^2k$ $A=0,03643088 m^2$ $L=0,72476935 m$

Pour diamètre intérieur du tube froid (d_i) = 0.012 m

	Cote tube (1)	Cote tube (2)
Débit w (kg/s)	0,500	1,635
Pr	0,002	0,018
Re	40001,237	10050
Vitesse v (m/s)	5,704	0,011
C.L.E h (w/m ² k)	10313,917	16,802
ΔP (Pa)	14369,624	0,059

$U = 16,758289 \text{ w/m}^2\text{k}$
 $A = 0,034462708 \text{ m}^2$
 $L = 0,60943448 \text{ m}$

IV-2-2-2/- 2^{am} Cas :

Température d'entrée fluide froid (T_e^1) = 253.15 k
 Température de sortie fluide froid (T_s^1) = 320 k
 Température d'entrée fluide chaud (T_e^2) = 413.15 k
 Température de sortie fluide chaud (T_s^2) = 393.15 k

IV-2-2-2-1/- Variation du diamètre intérieur du tube enveloppe :

Diamètre intérieur du tube froid (d_i) = 0.012 m
 Epaisseur du tube (e) = 0.003 m

- Pour diamètre intérieur du tube chaud (d_a) = 0.08 m

	Cote tube (1)	Cote tube (2)
Débit w (kg/s)	0,500	0,818
Pr	0,002	0,018
Re	40001,237	10050
Vitesse v (m/s)	5,704	0,011
C.L.E h (w/m ² k)	10313,917	16,802
ΔP (Pa)	13635,973	0,056

$U = 16,758289 \text{ w/m}^2\text{k}$
 $A = 0,032703191 \text{ m}^2$
 $L = 0,57831937 \text{ m}$

- Pour diamètre intérieur du tube chaud (d_a) = 0.1m

	Cote tube (1)	Cote tube (2)
Débit w (kg/s)	0,500	0,818
Pr	0,002	0,018
Re	40001,237	10050
Vitesse v (m/s)	5,704	0,009
C.L.E h (w/m^2k)	10313,917	15,117
ΔP (Pa)	15152,138	0,03

$$U = 15,081408 \text{ w/m}^2\text{k}$$

$$A = 0,036339417 \text{ m}^2$$

$$L = 0,64262193 \text{ m}$$

- Pour diamètre intérieur du tube chaud (d_e) = 0.12m

	Cote tube (1)	Cote tube (2)
Débit w (kg/s)	0,500	0,818
Pr	0,002	0,018
Re	40001,237	10050
Vitesse v (m/s)	5,704	0,007
C.L.E h (w/m^2k)	10313,917	13,868
ΔP (Pa)	16513,559	0,019

$$U = 13,838058 \text{ w/m}^2\text{k}$$

$$A = 0,039604514 \text{ m}^2$$

$$L = 0,70036154 \text{ m}$$

IV-2-2-2-2/- Variation du diamètre intérieur du tube intérieur :

Diamètre intérieur du tube chaud (d_a) = 0.08 m
 Epaisseur du tube (e) = 0.003 m

- Pour diamètre intérieur du tube froid (d_i) = 0.008 m

	Cote tube (1)	Cote tube (2)
Débit w (kg/s)	0,500	0,818
Pr	0,002	0,018
Re	60004,862	10050
Vitesse v (m/s)	12,835	0,009
C.L.E h (w/m ² k)	21398,705	14,906
ΔP (Pa)	136194,765	0,049

$$U = 14,885704 \text{ w/m}^2\text{k}$$

$$A = 0,036817157 \text{ m}^2$$

$$L = 0,83709073 \text{ m}$$

- Pour diamètre intérieur du tube froid (d_i) = 0.01 m

	Cote tube (1)	Cote tube (2)
Débit w (kg/s)	0,500	0,818
Pr	0,002	0,018
Re	48001,489	10050
Vitesse v (m/s)	8,214	0,010
C.L.E h (w/m ² k)	14320,22	15,883
ΔP (Pa)	38635,867	0,025

$$U = 15,852925 \text{ w/m}^2\text{k}$$

$$A = 0,034570878 \text{ m}^2$$

$$L = 0,68776571 \text{ m}$$

- Pour diamètre intérieur du tube froid (d_i) = 0.012 m

	Cote tube (1)	Cote tube (2)
Débit w (kg/s)	0,500	0,818
Pr	0,002	0,018
Re	40001,237	10050
Vitesse v (m/s)	5,704	0,011
C.L.E h (w/m ² k)	10313,973	16,802
ΔP (Pa)	13635,973	0,056

$$U = 16,758289 \text{ w/m}^2\text{k}$$

$$A = 0,032703191 \text{ m}^2$$

$$L = 0,57831937 \text{ m}$$

IV-2-2-3/- 3^{em} Cas :

Température d'entrée fluide froid (T_e^1) = 263.15 k
 Température de sortie fluide froid (T_s^1) = 320 k
 Température d'entrée fluide chaud (T_e^2) = 403.15 k
 Température de sortie fluide chaud (T_s^2) = 393.15 k

IV-2-2-3-1/- Variation du diamètre intérieur du tube enveloppe :

Diamètre intérieur du tube froid (d_i) = 0.012 m
 Epaisseur du tube (e) = 0.003 m

- Pour diamètre intérieur du tube chaud (d_e) = 0.08 m

	Cote tube (1)	Cote tube (2)
Débit w (kg/s)	0,500	1,391
Pr	0,002	0,018
Re	40001,237	10050
Vitesse v (m/s)	5,704	0,011
C.L.E h (w/m ² k)	10313,977	16,802
ΔP (Pa)	12719,199	0,052

$U = 16,758289 \text{ w/m}^2\text{k}$
 $A = 0,030504485 \text{ m}^2$
 $L = 0,3943777 \text{ m}$

- Pour diamètre intérieur du tube chaud (d_e) = 0.1m

	Cote tube (1)	Cote tube (2)
Débit w (kg/s)	0,500	1,391
Pr	0,002	0,018
Re	40001,237	10050
Vitesse v (m/s)	5,704	0,009
C.L.E h (w/m ² k)	10313,977	15,117
ΔP (Pa)	14133,429	0,028

$U = 15,081408 \text{ w/m}^2\text{k}$
 $A = 0,03389624 \text{ m}^2$
 $L = 0,59941715 \text{ m}$

- Pour diamètre intérieur du tube chaud (d_e) = 0.12m

	Cote tube (1)	Cote tube (2)
Débit w (kg/s)	0,500	1,391
Pr	0,002	0,018
Re	40001,237	10050
Vitesse v (m/s)	5,704	0,007
C.L.E h (w/m^2k)	10313,917	13,868
ΔP (Pa)	15403,318	0,017

$$U = 13,838058 \text{ w/m}^2\text{k}$$

$$A = 0,03694182 \text{ m}^2$$

$$L = 0,65327477 \text{ m}$$

IV-2-2-3-2/- Variation du diamètre intérieur du tube intérieur :

Diamètre intérieur du tube chaud (d_e) = 0.08 m
 Epaisseur du tube (e) = 0.003 m

- Pour diamètre intérieur du tube froid (d) = 0.008 m

	Cote tube (1)	Cote tube (2)
Débit w (kg/s)	0,500	1,391
Pr	0,002	0,018
Re	60001,862	10050
Vitesse v (m/s)	12,835	0,009
C.L.E h (w/m^2k)	21398,705	14,906
ΔP (Pa)	127038,091	0,045

$$U = 14,885704 \text{ w/m}^2\text{k}$$

$$A = 0,034341877 \text{ m}^2$$

$$L = 0,78081125 \text{ m}$$

- Pour diamètre intérieur du tube froid (d_i) = 0.01 m

	Cote tube (1)	Cote tube (2)
Débit w (kg/s)	0,500	1,391
Pr	0,002	0,018
Re	48001,489	10050
Vitesse v (m/s)	8,214	0,010
C.L.E h (w/m^2k)	14320,22	15,883
ΔP (Pa)	36038,297	0,049

$$U = 15,852925 \text{ w/m}^2\text{k}$$

$$A = 0,032246604 \text{ m}^2$$

$$L = 0,64152508 \text{ m}$$

- Pour diamètre intérieur du tube froid (d_i) = 0.012 m

	Cote tube (1)	Cote tube (2)
Débit w (kg/s)	0,500	1,391
Pr	0,002	0,018
Re	40001,237	10050
Vitesse v (m/s)	5,704	0,011
C.L.E h (w/m^2k)	10313,917	16,802
ΔP (Pa)	12719,199	0,052

$$U = 16,758289 \text{ w/m}^2\text{k}$$

$$A = 0,030504485 \text{ m}^2$$

$$L = 0,53943777 \text{ m}$$

IV-2-2-4/- 4^{ém} Cas :

Température d'entrée fluide froid (T_e^1) = 263.15 k
 Température de sortie fluide froid (T_s^1) = 320 k
 Température d'entrée fluide chaud (T_e^2) = 413.15 k
 Température de sortie fluide chaud (T_s^2) = 393.15 k

IV-2-2-4-1/- Variation du diamètre intérieur du tube enveloppe :

Diamètre intérieur du tube froid (d_i) = 0.012 m
 Epaisseur du tube (e) = 0.003 m

- Pour diamètre intérieur du tube chaud (d_e) = 0.08 m

	Cote tube (1)	Cote tube (2)
Débit w (kg/s)	0,500	0,695
Pr	0,002	0,018
Re	40001,237	10050
Vitesse v (m/s)	5,704	0,011
C.L.E h (w/m^2k)	10313,917	16,802
ΔP (Pa)	12061,424	0,045

$U = 16,758289 \text{ w/m}^2k$
 $A = 0,028926947 \text{ m}^2$
 $L = 0,51154071 \text{ m}$

- Pour diamètre intérieur du tube chaud (d_e) = 0.1m

	Cote tube (1)	Cote tube (2)
Débit w (kg/s)	0,500	0,695
Pr	0,002	0,018
Re	40001,237	10050
Vitesse v (m/s)	5,704	0,009
C.L.E h (w/m^2k)	10313,917	15,117
ΔP (Pa)	13402,52	0,027

$U = 15,081408 \text{ w/m}^2k$
 $A = 0,0321433 \text{ m}^2$
 $L = 0,56841832 \text{ m}$

- Pour diamètre intérieur du tube chaud (d_e) = 0.12m

	Cote tube (1)	Cote tube (2)
Débit w (kg/s)	0,500	0,695
Pr	0,002	0,018
Re	40001,237	10050
Vitesse v (m/s)	5,704	0,007
C.L.E h (w/m^2k)	10313,917	13,868
ΔP (Pa)	14606,736	0,016

$U = 13,838058 \text{ w/m}^2k$
 $A = 0,035031372 \text{ m}^2$
 $L = 0,61949068 \text{ m}$

IV-2-2-4-2/- Variation du diamètre intérieur du tube intérieur :

Diamètre intérieur du tube chaud (d_e) = 0.08 m

Épaisseur du tube (e) = 0.003 m

- Pour diamètre intérieur du tube froid (d_i) = 0.008 m

	Cote tube (1)	Cote tube (2)
Débit w (kg/s)	0,500	0,695
Pr	0,002	0,018
Re	60001,862	10050
Vitesse v (m/s)	12,835	0,009
C.L.E h (w/m ² k)	21398,705	14,906
ΔP (Pa)	120468,333	0,043

$$U = 14,885704 \text{ w/m}^2\text{k}$$

$$A = 0,032565885 \text{ m}^2$$

$$L = 0,74043166 \text{ m}$$

- Pour diamètre intérieur du tube froid (d_i) = 0.01 m

	Cote tube (1)	Cote tube (2)
Débit w (kg/s)	0,500	0,695
Pr	0,002	0,018
Re	48001,489	10050
Vitesse v (m/s)	8,214	0,010
C.L.E h (w/m ² k)	14320,22	15,883
ΔP (Pa)	34174,573	0,046

$$U = 15,852925 \text{ w/m}^2\text{k}$$

$$A = 0,030578973 \text{ m}^2$$

$$L = 0,60834932 \text{ m}$$

- Pour diamètre intérieur du tube froid (d_i) = 0.012 m

	Cote tube (1)	Cote tube (2)
Débit w (kg/s)	0,500	0,695
Pr	0,002	0,018
Re	40001,237	10050
Vitesse v (m/s)	5,704	0,011
C.L.E h (w/m ² k)	10313,917	16,802
ΔP (Pa)	12061,424	0,049

$U = 16,758289 \text{ w/m}^2\text{k}$
 $A = 0,028926947 \text{ m}^2$
 $L = 0,51154071 \text{ m}$

IV-2-3/-Débit massique $w_1=0,6\text{kg/s}$

IV-2-3-1/- 1^{er} Cas :

Température d'entrée fluide froid (T_e^1) = 253.15 k
 Température de sortie fluide froid (T_s^1) = 320 k
 Température d'entrée fluide chaud (T_e^2) = 403.15 k
 Température de sortie fluide chaud (T_s^2) = 393.15 k

IV-2-3-1-1/- Variation du diamètre intérieur du tube enveloppe :

Diamètre intérieur du tube froid (d_i) = 0.012 m
 Epaisseur du tube (e) = 0.003 m

- Pour diamètre intérieur du tube chaud (d_a) = 0.08 m

	Cote tube (1)	Cote tube (2)
Débit w (kg/s)	0,600	1,962
Pr	0,002	0,018
Re	48001,489	10050
Vitesse v (m/s)	1,962	0,011
C.L.E h (w/m ² k)	11933,517	16,802
ΔP (Pa)	23766,808	0,07

$U = 16,763836 \text{ w/m}^2\text{k}$
 $A = 0,041341567 \text{ m}^2$
 $L = 0,73107945 \text{ m}$

- Pour diamètre intérieur du tube chaud (d_e) = 0.1m

	Cote tube (1)	Cote tube (2)
Débit w (kg/s)	0,600	1,962
Pr	0,002	0,018
Re	48001,489	10050
Vitesse v (m/s)	6,845	0,009
C.L.E h (w/m^2k)	11933,517	15,117
ΔP (Pa)	26410,284	0,032

$$U=15,085899 \text{ w/m}^2\text{k}$$

$$A=0,045939812 \text{ m}^2$$

$$L=0,8123942 \text{ m}$$

- Pour diamètre intérieur du tube chaud (d_e) = 0.12m

	Cote tube (1)	Cote tube (2)
Débit w (kg/s)	0,600	1,962
Pr	0,002	0,018
Re	48001,489	10050
Vitesse v (m/s)	6,845	0,007
C.L.E h (w/m^2k)	11933,517	13,868
ΔP (Pa)	28783,953	0,023

$$U=13,838058 \text{ w/m}^2\text{k}$$

$$A=0,041735339 \text{ m}^2$$

$$L=0,73804283 \text{ m}$$

IV-2-3-1-2/- Variation du diamètre intérieur du tube intérieur :

Diamètre intérieur du tube chaud (d_e) = 0.08 m
 Epaisseur du tube (e) = 0.003 m

- Pour diamètre intérieur du tube froid (d_i) = 0.008 m

	Cote tube (1)	Cote tube (2)
Débit w (kg/s)	0,600	1,962
Pr	0,002	0,018
Re	72002,232	10050
Vitesse v (m/s)	15,402	0,009
C.L.E h (w/m^2k)	24758,978	14,906
ΔP (Pa)	237772,330	0,062

$$U=14,888164 \text{ w/m}^2\text{k}$$

$$A=0,04659957 \text{ m}^2$$

$$L=1,0583792 \text{ m}$$

- Pour diamètre intérieur du tube froid (d_i) = 0.01 m

	Cote tube (1)	Cote tube (2)
Débit w (kg/s)	0,600	1,962
Pr	0,002	0,018
Re	57601,791	10050
Vitesse v (m/s)	9,857	0,010
C.L.E h (w/m^2k)	16568,931	15,883
ΔP (Pa)	67390,626	0,066

$$U=15,856739 \text{ w/m}^2\text{k}$$

$$A=0,043706551 \text{ m}^2$$

$$L=0,86951416 \text{ m}$$

- Pour diamètre intérieur du tube froid (d_i) = 0.012 m

	Cote tube (1)	Cote tube (2)
Débit w (kg/s)	0,600	1,962
Pr	0,002	0,018
Re	48001,489	10050
Vitesse v (m/s)	6,845	0,011
C.L.E h (w/m^2k)	11933,517	16,802
ΔP (Pa)	23766,808	0,07

$$U=16,763836 \text{ w/m}^2\text{k}$$

$$A=0,041341567 \text{ m}^2$$

$$L=0,73107945 \text{ m}$$

IV-2-3-2/- 2^{ème} Cas :

Température d'entrée fluide froid (T_e^1) = 253.15 k
 Température de sortie fluide froid (T_s^1) = 320 k
 Température d'entrée fluide chaud (T_e^2) = 413.15 k
 Température de sortie fluide chaud (T_s^2) = 393.15 k

IV-2-3-2-1/- Variation du diamètre intérieur du tube enveloppe :

Diamètre intérieur du tube froid (d_i) = 0.012 m
 Epaisseur du tube (e) = 0.003 m

- Pour diamètre intérieur du tube chaud (d_e) = 0.08 m

	Cote tube (1)	Cote tube (2)
Débit w (kg/s)	0,600	0,981
Pr	0,002	0,018
Re	48001,489	10050
Vitesse v (m/s)	6,845	0,011
C.L.E h (w/m ² k)	11933,517	16,802
ΔP (Pa)	22553,378	0,067

$U = 16,763836$ w/m²k
 $A = 0,03923085$ m²
 $L = 0,69375371$ m

- Pour diamètre intérieur du tube chaud (d_e) = 0.1m

	Cote tube (1)	Cote tube (2)
Débit w (kg/s)	0,600	0,981
Pr	0,002	0,018
Re	48001,489	10050
Vitesse v (m/s)	6,845	0,009
C.L.E h (w/m ² k)	11933,517	15,117
ΔP (Pa)	25061,893	0,016

$U = 15,085899$ w/m²k
 $A = 0,043594321$ m²
 $L = 0,77091687$ m

- Pour diamètre intérieur du tube chaud (d_e) = 0.12m

	Cote tube (1)	Cote tube (2)
Débit w (kg/s)	0,600	0,981
Pr	0,002	0,018
Re	48001,489	10050
Vitesse v (m/s)	6,845	0,007
C.L.E h (w/m^2k)	11933,517	13,868
ΔP (Pa)	27314.370	0,022

$$U = 13,841840 \text{ w/m}^2\text{k}$$

$$A = 0,047512435 \text{ m}^2$$

$$L = 0,84020429 \text{ m}$$

IV-2-3-2-2/- Variation du diamètre intérieur du tube intérieur :

Diamètre intérieur du tube chaud (d_a) = 0.08 m
 Epaisseur du tube (e) = 0.003 m

- Pour diamètre intérieur du tube froid (d_i) = 0.008 m

	Cote tube (1)	Cote tube (2)
Débit w (kg/s)	0,600	0,981
Pr	0,002	0,018
Re	72002.232	10050
Vitesse v (m/s)	15,402	0,009
C.L.E h (w/m^2k)	24758,978	14,906
ΔP (Pa)	225632,682	0,058

$$U = 14,888164 \text{ w/m}^2\text{k}$$

$$A = 0,044173318 \text{ m}^2$$

$$L = 1,004343 \text{ m}$$

- Pour diamètre intérieur du tube froid (d_i) = 0.01 m

	Cote tube (1)	Cote tube (2)
Débit w (kg/s)	0,600	0,981
Pr	0,002	0,018
Re	57601,791	10050
Vitesse v (m/s)	9,857	0,010
C.L.E h (w/m^2k)	16568,931	15,883
ΔP (Pa)	63949,954	0,063

$$U = 15,856739 \text{ w/m}^2\text{k}$$

$$A = 0,041475081 \text{ m}^2$$

$$L = 0,82512056 \text{ m}$$

- Pour diamètre intérieur du tube froid (d_i) = 0.012 m

	Cote tube (1)	Cote tube (2)
Débit w (kg/s)	0,600	0,981
Pr	0,002	0,018
Re	48001,489	10050
Vitesse v (m/s)	6,845	0,011
C.L.E h (w/m^2k)	11933,517	16,802
ΔP (Pa)	22553,378	0,067

$$U = 16,763836 \text{ w/m}^2\text{k}$$

$$A = 0,03923085 \text{ m}^2$$

$$L = 0,69375371 \text{ m}$$

IV-2-3-3/- 3^{em} Cas :

Température d'entrée fluide froid (T_e^1) = 263.15 k

Température de sortie fluide froid (T_s^1) = 320 k

Température d'entrée fluide chaud (T_e^2) = 403.15 k

Température de sortie fluide chaud (T_s^2) = 393.15 k

IV-2-2-3-1/- Variation du diamètre intérieur du tube enveloppe :

Diamètre intérieur du tube froid (d_i) = 0.012 m

Epaisseur du tube (e) = 0.003 m

- Pour diamètre intérieur du tube chaud (d_e) = 0.08 m

	Cote tube (1)	Cote tube (2)
Débit w (kg/s)	0,600	1,669
Pr	0,002	0,018
Re	48001,489	10050
Vitesse v (m/s)	6,845	0,011
C.L.E h (w/m^2k)	11933,517	16,802
ΔP (Pa)	21037,065	0,062

$$U = 16,763836 \text{ w/m}^2\text{k}$$

$$A = 0,036593273 \text{ m}^2$$

$$L = 0,6471111 \text{ m}$$

- Pour diamètre intérieur du tube chaud (d_e) = 0.1m

	Cote tube (1)	Cote tube (2)
Débit w (kg/s)	0,600	1,669
Pr	0,002	0,018
Re	48001,489	10050
Vitesse v (m/s)	6,845	0,009
C.L.E h (w/m^2k)	11933,517	15,117
ΔP (Pa)	23376,925	0,034

$$U = 15,085899 \text{ w/m}^2\text{k}$$

$$A = 0,040663379 \text{ m}^2$$

$$L = 0,7190864 \text{ m}$$

- Pour diamètre intérieur du tube chaud (d_e) = 0.12m

	Cote tube (1)	Cote tube (2)
Débit w (kg/s)	0,600	1,669
Pr	0,002	0,018
Re	48001,489	10050
Vitesse v (m/s)	6,845	0,007
C.L.E h (w/m^2k)	11933,517	13,868
ΔP (Pa)	25477,966	0,021

$$U = 13,841840 \text{ w/m}^2\text{k}$$

$$A = 0,044318071 \text{ m}^2$$

$$L = 0,78371554 \text{ m}$$

IV-2-3-3-2/- Variation du diamètre intérieur du tube intérieur :

Diamètre intérieur du tube chaud (d_e) = 0.08 m
 Epaisseur du tube (e) = 0.003 m

- Pour diamètre intérieur du tube froid (d_i) = 0.008 m

	Cote tube (1)	Cote tube (2)
Débit w (kg/s)	0,600	1,669
Pr	0,002	0,018
Re	72002,232	10050
Vitesse v (m/s)	15,402	0,009
C.L.E h (w/m ² k)	24758,978	14,906
ΔP (Pa)	210462,912	0,055

$U = 14,888164 \text{ w/m}^2\text{k}$
 $A = 0,04120344 \text{ m}^2$
 $L = 0,93681883 \text{ m}$

- Pour diamètre intérieur du tube froid (d_i) = 0.01 m

	Cote tube (1)	Cote tube (2)
Débit w (kg/s)	0,600	1,669
Pr	0,002	0,018
Re	57601,791	10050
Vitesse v (m/s)	9,857	0,010
C.L.E h (w/m ² k)	16568,931	15,883
ΔP (Pa)	59650,462	0,058

$U = 15,856739 \text{ w/m}^2\text{k}$
 $A = 0,03868662 \text{ m}^2$
 $L = 0,76964586 \text{ m}$

- Pour diamètre intérieur du tube froid (d_i) = 0.012 m

	Cote tube (1)	Cote tube (2)
Débit w (kg/s)	0,600	1,669
Pr	0,002	0,018
Re	48001,489	10050
Vitesse v (m/s)	6,845	0,011
C.L.E h (w/m ² k)	11933,517	16,802
ΔP (Pa)	21037,065	0,062

$$U = 16,763836 \text{ w/m}^2\text{k}$$

$$A = 0,036593273 \text{ m}^2$$

$$L = 0,6471111 \text{ m}$$

IV-2-3-4/- 4^{em} Cas :

Température d'entrée fluide froid (T_e^1) = 263.15 k
 Température de sortie fluide froid (T_s^1) = 320 k
 Température d'entrée fluide chaud (T_e^2) = 413.15 k
 Température de sortie fluide chaud (T_s^2) = 393.15 k

IV-2-3-4-1/- Variation du diamètre intérieur du tube enveloppe :

Diamètre intérieur du tube froid (d_i) = 0.012 m
 Epaisseur du tube (e) = 0.003 m

- Pour diamètre intérieur du tube chaud (d_e) = 0.08 m

	Cote tube (1)	Cote tube (2)
Débit w (kg/s)	0,600	0,834
Pr	0,002	0,018
Re	48001,489	10050
Vitesse v (m/s)	6,845	0,011
C.L.E h (w/m ² k)	11933,517	16,802
ΔP (Pa)	19949,135	0,059

$$U = 16,763836 \text{ w/m}^2\text{k}$$

$$A = 0,034700852 \text{ m}^2$$

$$L = 0,61364579 \text{ m}$$

- Pour diamètre intérieur du tube chaud (d_e) = 0.1m

	Cote tube (1)	Cote tube (2)
Débit w (kg/s)	0,600	0,834
Pr	0,002	0,018
Re	48001,489	10050
Vitesse v (m/s)	6,845	0,009
C.L.E h (w/m^2k)	11933,517	15,117
ΔP (Pa)	22167,988	0,032

$$U = 15,085899 \text{ w/m}^2\text{k}$$

$$A = 0,038560476 \text{ m}^2$$

$$L = 0,68189889 \text{ m}$$

- Pour diamètre intérieur du tube chaud (d_e) = 0.12m

	Cote tube (1)	Cote tube (2)
Débit w (kg/s)	0,600	0,834
Pr	0,002	0,018
Re	48001,489	10050
Vitesse v (m/s)	6,845	0,007
C.L.E h (w/m^2k)	11933,517	13,868
ΔP (Pa)	24160,374	0,02

$$U = 13,841184 \text{ w/m}^2\text{k}$$

$$A = 0,04206162 \text{ m}^2$$

$$L = 0,74318569 \text{ m}$$

IV-2-3-4-2/- Variation du diamètre intérieur du tube intérieur :

Diamètre intérieur du tube chaud (d_e) = 0.08 m
 Epaisseur du tube (e) = 0.003 m

- Pour diamètre intérieur du tube froid (d_i) = 0.008 m

	Cote tube (1)	Cote tube (2)
Débit w (kg/s)	0,600	0,834
Pr	0,002	0,018
Re	72002,232	10050
Vitesse v (m/s)	15,402	0,009
C.L.E h (w/m ² k)	24758,978	14,906
ΔP (Pa)	199578,821	0,052

$U = 14,888164 \text{ w/m}^2\text{k}$
 $A = 0,039072614 \text{ m}^2$
 $L = 0,88837134 \text{ m}$

- Pour diamètre intérieur du tube froid (d_i) = 0.01 m

	Cote tube (1)	Cote tube (2)
Débit w (kg/s)	0,600	0,834
Pr	0,002	0,018
Re	57601,791	10050
Vitesse v (m/s)	9,857	0,010
C.L.E h (w/m ² k)	16568,931	15,883
ΔP (Pa)	56565,630	0,055

$U = 15,856739 \text{ w/m}^2\text{k}$
 $A = 0,036685943 \text{ m}^2$
 $L = 0,72984367 \text{ m}$

- Pour diamètre intérieur du tube froid (d_i) = 0.012 m

	Cote tube (1)	Cote tube (2)
Débit w (kg/s)	0,600	0,834
Pr	0,002	0,018
Re	48001,489	10050
Vitesse v (m/s)	6,845	0,011
C.L.E h (w/m ² k)	11933,517	16,802
ΔP (Pa)	19949,135	0,059

$U = 16,763836 \text{ w/m}^2\text{k}$
 $A = 0,034700852 \text{ m}^2$
 $L = 0,61364579 \text{ m}$

CONCLUSION :

L'analyse des résultats précédents repose sur le choix des diamètres pour les-quels les pertes de charges sont minimales avec des vitesses d'écoulements minimales.

Les longueurs des tubes sont importantes parce qu'on a utilisé le modèle de deux tubes coaxiaux. En pratique, les échangeurs sont à plusieurs tubes intérieurs et par conséquent leurs longueurs sont réduites.

Le matériau du tube intérieur a été choisi comme étant le cuivre avec une épaisseur de 3mm. Mais en général les matériaux des tubes intérieurs sont des alliages de cuivre avec des coefficients de conductivité thermique plus faibles que celle du cuivre pur. L'épaisseur est déterminée par un calcul de résistance.

Le but de notre travail a été atteint pour la conception d'un échangeur mono tubulaire didactique permettant la mise en évidence des équations de base du transfert thermique. Il serait souhaitable de faire une réalisation et relever les paramètres (Températures, pression) à l'entrée et à la sortie de l'échangeur et les comparer aux valeurs données par le modèle théorique de conception.

BIBLIOGRAPHIE

- 1) TRANSMISSION DE LA CHALEUR
Par SCHMIDT GURGEN
INES TIARET 1993
- 2) CHEMICAL ENGINEERS HAND BOOK
PERRY R.H and CHILTON C.H
5^{ME} EDITION, Mc GRAN HILL, (P- 10-15)
- 3) MANUEL CFM56-7B
- 4) FLUID MECHANICS SOURCE BOOK
Par GRAW-HILL
INES NEW YORK ST. LOUIS SAN FRANCISCO.

ANNEXE

PROGRAMME FORTRAN 77 DE CALCUL

```

*****
***** PROGRAMME FORTRAN 77 DE CALCUL *****
*****

```

```

real k1,mi1,cp1,ro1,k2,mi2,cp2,ro2,landa,v1,w1,te1,ts1,te2,di,de,c
+,ts2,Q,w2,h1,h2,U,A,L,deltap1,deltap2,deltaTml,Deq,f2,f1,Re,v2,Ree
+q,pi,Pr1,Pr2
open(1,file='said.dat')
open(2,file='affich.dat')
pi=acos(-1.)
read(1,*)k1,mi1,cp1,ro1,k2,mi2,cp2,ro2,landa
write(*,*)'donner la valeur de w1='
read(*,*)w1
write(*,*)'donner la valeur de te1='
read(*,*)te1
write(*,*)'donner la valeur de ts1='
read(*,*)ts1
write(*,*)'donner la valeur de te2='
read(*,*)te2
write(*,*)'donner la valeur de di='
read(*,*)di
write(*,*)'donner la valeur de de='
read(*,*)de
write(*,*)'donner la valeur de e='
read(*,*)e
write(*,*)'donner la valeur de ts2='
read(*,*)ts2
write(*,*)'donner le nombre de reynolds a l-exterieur de tube='
read(*,*)Reeq
c calcul de Re
Re=4*W1/(mi1*di*Pi)
c calcul de Pr
Pr1=mi1*Cp1/k1
Pr2=mi2*Cp2/k2
c calcul de la quantite de chaleur ,chang,c Q
Q=w1*cp1*(ts1-te1)
write(*,*)'Q=',Q
c calcul du debit de huile w2
w2=Q/(cp2*(te2-ts2))
write(*,*)'w2=',w2
c calcul du coefficient d',change h1
v1=Re*mi1/(di*ro1)
h1=(k1/di)*0.023*(di*v1*ro1/mi1)**(0.8)*(cp1*mi1/k1)**(1/3)
write(*,*)'h1=',h1
c calcul du coefficient d',change h2
Deq=(de-(di+2*e)**2)/(di+2*e)
v2=Reeq*mi2/(Deq*ro2)
h2=(k2/Deq)*0.02*(Deq*v2*ro2/mi2)**0.8*(cp2*mi2/k2)**(1/3)*(de/
+(di+2*e)**(0.53))
write(*,*)'h2=',h2
c calcul du coefficient d',change global U
U=1/(h1*(di/(di+2*e)))+e/(landa*(di+e)/(di+2*e))+1/h2
U=1/U

```

```

write(*,*)'U=' ,U
C  calcul de la surface d',change A
deltaTml=((te2-ts1)-(ts2-te1))/log((te2-ts1)/(ts2-te1))
write(*,*)'deltaTml=' ,deltaTml
A=Q/(U*deltaTml)
write(*,*)'A=' ,A
c  calcul de la longueur L
L=A/(pi*(di+2*c))
write(*,*)'L=' ,L
c  calcul du perte de charge deltap1
f1=0.0014+0.125*((di*v1*ro1)/mi1)**(-0.32)
deltap1=2*f1*(L/di)*ro1*v1**2
write(*,*)'deltap1=' ,deltap1
c  calcul du perte de charge deltap2
f2=0.0014+0.125*((dc-di)*v2*ro2)/mi2)**(-0.32)
deltap2=2*f2*(L/(dc-di))*ro2*v2**2
write(*,*)'deltap2=' ,deltap2
c***** Affichage des resultats:*****
write(2,11)
11 format(20x,'E',13('I'),'E',13('I'),'>')
write(2,12)
12 format(20x,'Cote Tube (1)',',',',Cote Tube (2)',',')
write(2,13)
13 format(2x,'E',17('I'),'I',13('I'),'I',13('I'),'')
write(2,14)w1,w2
14 format(2x,' Debit W [Kg/s] ',',',f13.3,',',f13.3,',')
write(2,15)
15 format(2x,'I',17('I'),'I',13('I'),'I',13('I'),'')
write(2,16)Pr1,Pr2
16 format(2x,' Pr',7x,',',f13.3,',',f13.3,',')
write(2,17)
17 format(2x,'I',17('I'),'I',13('I'),'I',13('I'),'')
write(2,18)Re,Recq
18 format(2x,' Re',7x,',',f13.3,',',f13.3,',')
write(2,19)
19 format(2x,'I',17('I'),'I',13('I'),'I',13('I'),'')
write(2,20)v1,v2
20 format(2x,' Vitesse V[m/s]',1x,',',f13.3,',',f13.3,',')
write(2,21)
21 format(2x,'I',17('I'),'I',13('I'),'I',13('I'),'')
write(2,22)h1,h2
22 format(2x,' C.L.E h [W/m^2K]',',',f13.3,',',f13.3,',')
write(2,23)
23 format(2x,'I',17('I'),'I',13('I'),'I',13('I'),'')
write(2,24)deltap1,deltap2
24 format(2x,' DeltaP [Pa]',3x,',',f13.3,',',f13.3,',')
write(2,25)
25 format(2x,'E',17('I'),'E',13('I'),'E',13('I'),'')
write(2,*)' U=' ,u
write(2,*)' A=' ,a
write(2,*)' L=' ,l
c*****
stop
end

```

LES DONNEES DE CALCUL

- Propriétés physico-chimiques :

Conductivité thermique du liquide froid (fuel) : $K_1 = 1.12 \text{ w/m k}$
Conductivité thermique du liquide chaud (huile) : $K_2 = 1.06 \text{ w/m k}$
Viscosité dynamique du liquide froid (fuel) : $\mu_1 = 0.00132625 \text{ poiseuille}$
Viscosité dynamique du fluide chaud (huile) : $\mu_2 = 0.0049245 \text{ poiseuille}$
Masse volumique du liquide froid (fuel) : $\rho_1 = 775 \text{ kg/m}^3$
Masse volumique du liquide chaud (huile) : $\rho_2 = 1005 \text{ kg/m}^3$
Capacité calorifique du liquide froid (fuel) : $C_{p1} = 1.8854 \text{ J/kg k}$
Capacité calorifique du liquide chaud (huile) : $C_{p2} = 3.854 \text{ J/kg, k}$
Conductivité thermique du métal : $\lambda = 389 \text{ w/mk}$