

وزارة التعليم العالي
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

Département : GENIE MECANIQUE

مكتبة لوجبة هندسة اقتيات
BIBLIOTHEQUE - المكتبة
Ecole Nationale Polytechnique

1 ea

Projet de Fin d'Etudes

S U J E T

REMISE EN ETAT DU BANC
DE CONVECTION FORCEE

Proposé par :

YOUNSI

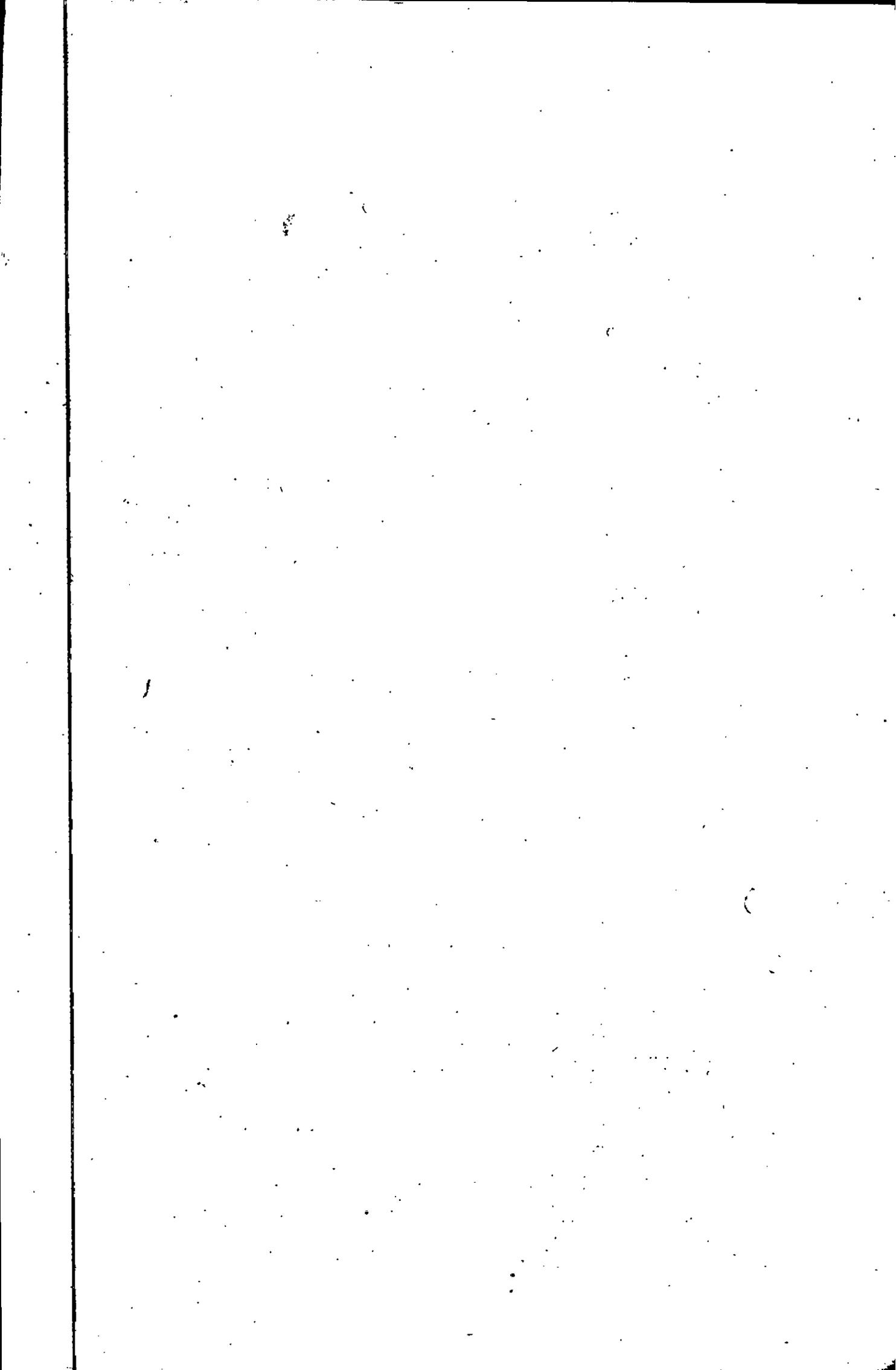
Etudié par :

BOUDJEMAI - A

Dirigé par :

YOUNSI

Promotion : Juin 1989



ÉCOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

DEPARTEMENT

المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
BIBLIOTHEQUE — المكتبة
Ecole Nationale Polytechnique

PROJET DE FIN D'ETUDES

S U J E T

Proposé par :

YOUNSI

Etudié par :

BOUDJENAI - A.

Dirigé par :

YOUNSI

PROMOTION :

Remerciements :

Je vous remercie, Monsieur YOUNSI encadreur pour la protection et l'aide que vous m'avez accordées ; comme je ne saurais vous assurer de ma reconnaissance, Monsieur Ahmed Zaid responsable du matériel ainsi que tous ceux qui ont contribué à mon aide, pour le service et la manière dont vous vous êtes employés pour moi. Je remercie également Monsieur BENNOUR d'avoir accepté de présider le jury, ainsi que Monsieur KHEMIS pour sa participation à l'examen de ce présent travail. Veuillez agréer mesieurs, l'expression de mon plus profond respect.

Ministère de l'enseignement supérieur

وزارة التعليم العالي

Ecole nationale polytechnique

المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات

Département Genie mécanique

دائرة الهندسة الميكانيكية

Promoteur : M^r N. YOUNSI

الموجه : ن. يونس

Etudiant : M^r BOUDJEMAÏ Ahmed.

الطالب : أحمد بوجمعي

المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
المكتبة - BIBLIOTHEQUE
Ecole Nationale Polytechnique

يتضمن هذا المشروع عملي تصليح متقدمة تجريب
للتوسيل الحراري التبريد والمتواحدة لدى دائرة
الهندسة الكيميائية. و ينبغي لهذا الجهاز بعد
تصليحه أن يعطي نتائج تستعمل من أجل
حساب معامل انتقال الحرارة، معامل الاحتكاك،
والتحقق من مدى صحة مماثلة رينولدز.

L'objet de ce projet est la remise en état et en service
du Banc d'essai de convection forcée "TECQUIPMENT" se
trouvant au laboratoire C2 du genie chimique. après cela
l'appareil doit donner des resultats servant à calculer
le coefficient de transmission de la chaleur, le coefi-
cient de frottement et la verification de la validité de
l'analogie de Reynolds.

This work has for object réparation of forced convection
engin "TECQUIPMENT" in chemical engineering C2 laboratory
After, this machine must give results used to calculate
heat transfert coefficient, friction coefficient and to test
the vailibility of Reynolds analogie

S O M M A I R E.

- ABREGE	4
- I Remise en service du Banc	2
- I.1 Description du Banc	
- I.2 Caracteristique de l'appareil	3
I.3 Alimentation electrique	4
- I.4 Mesure des temperature	5
- I.4.1 Emplacement des thermocouples	
- I.4.2 Determination des pannes	6
- I.4.3 Préparation des soudures chaudes (thermocouple de I à 7)	7
- I.4.4 Fixation des thermocouple au tube	9
- I.4.5 Thermocouple (conception et montage)	13
- I.4.6 Montage proposé. Integration D'I millivoltmetre	16
- 2 Theorie	20
- 2. I Introduction	
- 2.2 les differents modes de la transmission de la chaleur	24
- 2.3 Convection forcée pour un fluide mono- phasique	

- 2.3.1 Mécanisme de la convection	
- 2.3.2 Les regimes d'écoulement	23
-2.3.3 Modèle de frottement en régimes turbulent	24
- 2.3.4 Modèle de frottement en regime turbulent dans les tuyaux rugueux	
- 2.3.5 Solution empirique (proposée par la con- structeur).	25
—3 Experience typique de transfert de chaleur par convection forcée	30
-3.1 Objet	
-3.2 Déroulement de l'experience	
- 3.3 Mesure	31
- 3.4 Calculs	33
- 3.5 Interpretation et Conclusion.	43

ABREGE

Ce présent travail a pour objet la remise en état et en service du banc d'essai de convection forcé équipé ce trouvant au laboratoire C2 de department genie chimique.

Nous avons pour cela adopté la marche suivante :

- Examen du banc d'essai et detection de pannes dans les differents organes défectueux à savoir les thermocouples, les manometres différentiels et l'interrupteur de chauffe.
- Ressensement de certains accessoires en moins telque les tuyaux de raccordement des manomètres, la lampe témoin de la chauffe et sa douille.
- Reparation de tous les thermocouples, fixation sur le tube pour ceux numerotés de I à 7 et realisation d'un montage qui, combiné à l'ancien et au moyen du selecteur de thermocouples peut permettre une lecture directe des temperatures dans les differents points considerés et ceci à l'aide d'un millivoltmètre à affichage numérique duquel nous avons effectué l'etallonage.
- Substitution de l'interrupteur de chauffe defectueux par I interrupteur neuf.
- Nettoyage des manomètres et leur réglage
- L'etallonage du thermomètre servant à mesurer la temperature a l'entrée.

.../...

I Remise en service du Banc

I.I Description du Banc

L'appareil se compose d'un ventilateur centrifuge, qui est entraîné par un moteur électrique et qui aspire l'air à travers une vanne de commande et le refoule dans un tube de 76,2 MM de diamètre soudé en U.

La vitesse du ventilateur reste constante. Un diaphragme de 40 MM de diamètre (BRITISH STANDARD) est placé sur le tube et permet de mesurer le débit d'air. Ce tube est relié au tube de cuivre; objet de l'essai, qui a 3048 MM de long - 32,6 MM de diamètre intérieur - et une épaisseur de 1,2 MM ce tube de cuivre, qui débouche à l'air libre est chauffé électriquement sur la longueur finale de 1753 MM par un ruban chauffant enroulé sur le tube extérieurement on peut faire varier la puissance appliquée au ruban chauffant au moyen d'un transformateur réglable, fixé à l'appareil; cette puissance étant *obtenue à* l'aide d'un voltmètre et d'un ampèremètre fixés sur le panneau qui porte les instruments.

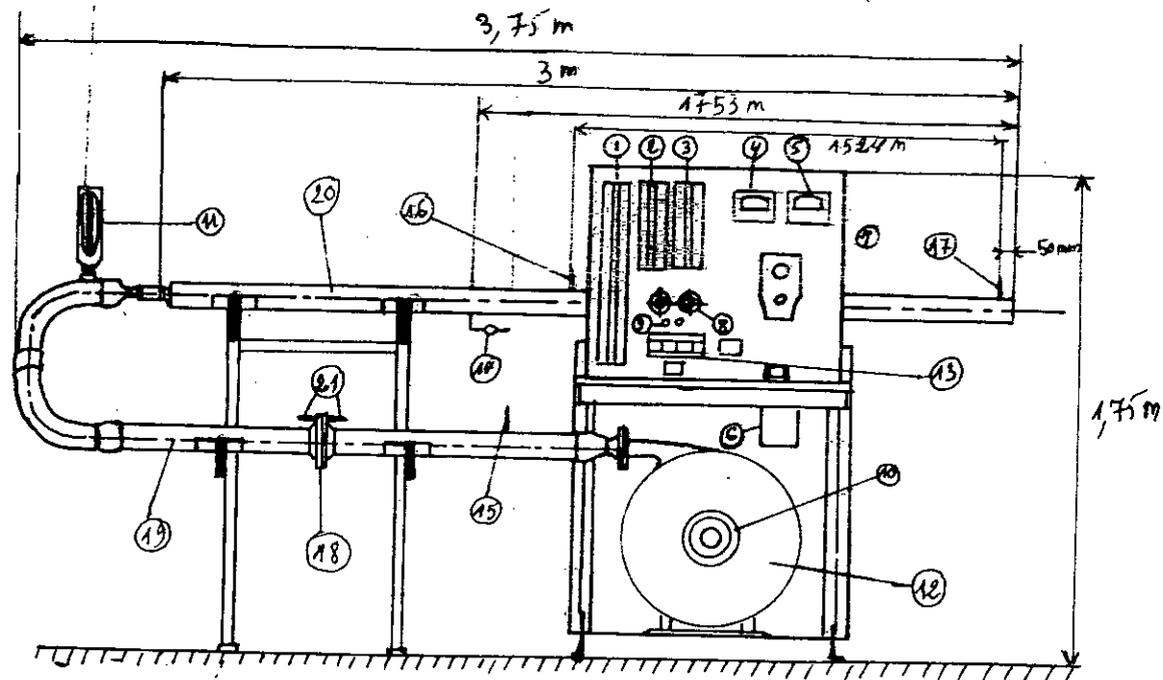
Le tube de cuivre est isolé thermiquement par une garniture de laine de verre de 25 MM d'épaisseur.

Tout ce montage repose sur des supports en bois fixés sur le cadre en acier de l'appareil.

Dans la partie chauffée du tube de cuivre, une longueur de 1524 MM est munie à chaque extrémité de prises de pression que l'on raccorde à un manomètre à eau du panneau d'instruments.

Les autres manomètres que porte ce panneau mesurant la pression de refoulement du ventilateur et la chute de pression du diaphragme.

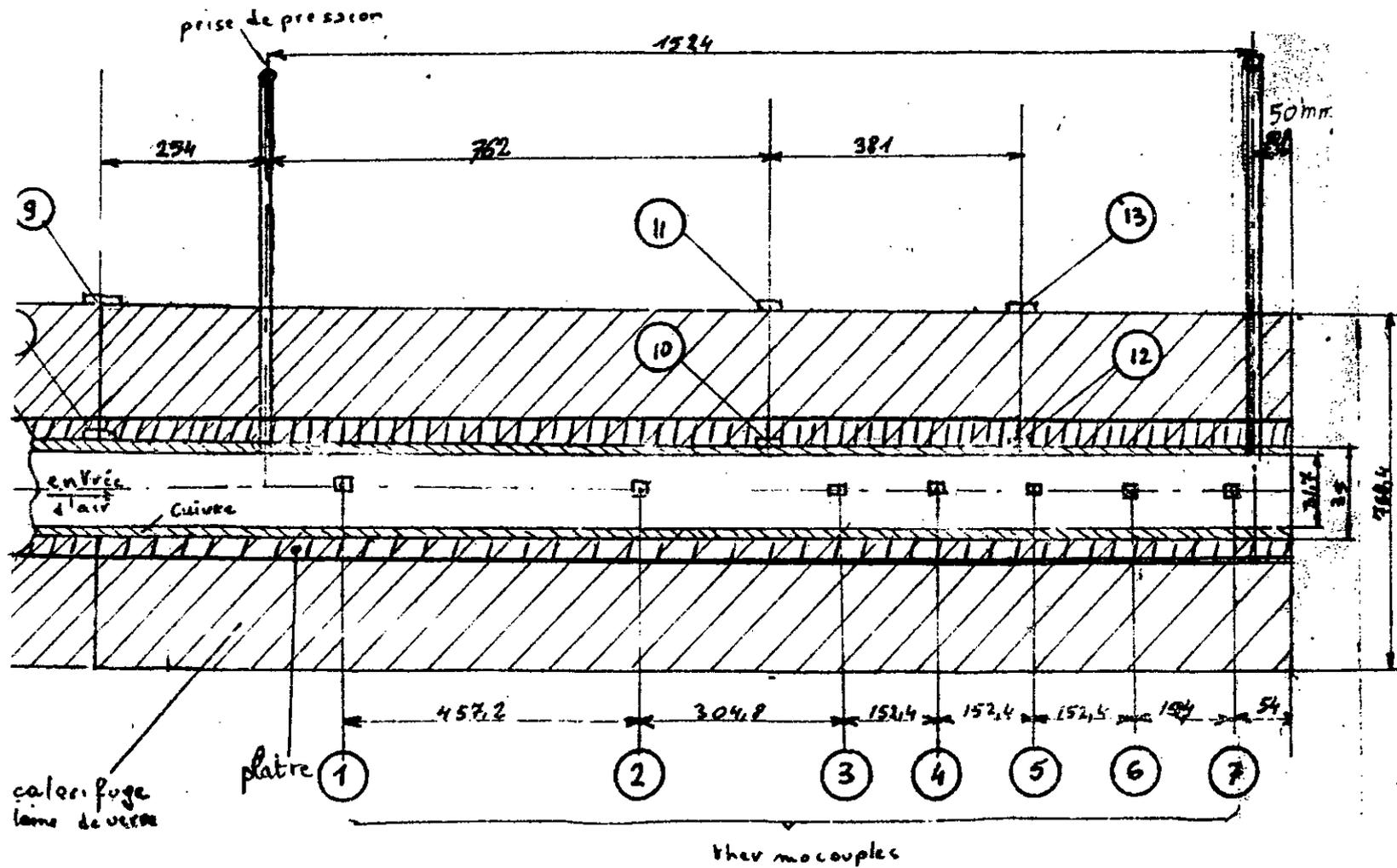
.../...



Disposition générale de l'appareil

REPERAGE DES APPAREILS

1. Manomètre de pression du ventilateur
2. Manomètre de chute de pression du diaphragme
3. Manomètre de perte de charge de la longueur en essai
4. Ampermetre du courant de chauffage
5. Voltmetre de la tension de chauffage
6. Transformateur réglable de puissance de chauffage.
7. Sectionneur et démarreur du moteur du ventilateur
8. Sélecteur de thermocouple
9. Borne de raccordement à l'instrument de mesure
10. Vanne de commande du débit d'air
11. Thermomètre de température d'air à l'entrée
12. Ventilateur centrifuge électrique
13. Millivoltmètre à affichage numérique
14. Bornes de l'élément chauffant
15. Prise de pression du ventilateur
16. Prise de pression d'entrée
17. Prise de pression de sortie
18. Diaphragme
19. Canalisation d'entrée d'air
20. isolation en deux parties (plâtre + laine de verre)
21. Prise de pression du diaphragme



... EMPLACEMENT DES Thermocouples.

Sept thermocouples (numérotés de I à 7) sont fixés à la paroi du tube de cuivre, en divers points répartis sur la longueur chauffée. Six thermocouples supplémentaires (numérotés de 8 à 13) sont placés en des points situés dans la garniture isolante. Un schéma apposé sur le panneau de mesure montre les emplacements de tous les thermocouples. (voir figure).

Un thermomètre à mercure mesure la température à l'entrée du tube d'essai

Au moyen d'un sélecteur sur le panneau, on peut choisir le thermocouple dont on peut mesurer la température.

I.2 Caractéristiques de l'appareil.

Diamètre du diaphragme.....41 MM
Diamètre intérieur du tube..... 31,75 MM
Épaisseur du tube..... 1,63 MM
Conductibilité du tube (cuivre) 380,6 W/M.°C
Épaisseur de l'isolation thermique..... 79 MM
Conductibilité du matériau de l'isolant.....0,0415-
W/MM.°C.
Longueur de tube chauffé..... 1753 MM
Constitution des thermocouples.... CUIVRE Constan-
tan.

Les prises de pression dans le tube sont à 51 MM et 1575 MM de la sortie.

Température maximale possible du tube : 150 °C.

.../...

I.3 Alimentation électrique

Problème du transformateur;

Dans le labo de C2, on ne disposait pas de courant triphasé 380 V mais de 220 V.

L'obtention du 380 V triphasé était assurée par un transformateur électrique baignant dans du pyralène, fluide consérigène.

Les transformateurs de ce genre ne sont plus utilisés actuellement pour des raisons de sécurité.

Afin d'écartier tout danger, nous avons pris l'initiative d'assurer l'alimentation électrique en 380 V TRIPHASE par I branchement directe sur le secteur que nous avons raccordé à un tableau d'alimentation.

Problème de l'interrupteur de chauffe.

Après I serie de tests de continuité de circuit électrique en se servant d'un multimètre il s'est avéré que l'interrupteur de chauffe était defectueux et était à l'origine du problème de court-circuit qui menaçait tous les organes du circuit électrique du Banc y compris l'alimentation.

I) Interrupteur neuf est substitué au defectueux et le problème est ainsi définitivement résolu.

Pour la lampe témoin de chauffe, I lampe 220 V - 25 W + douille à vis sont placés à côté de l'interrupteur.

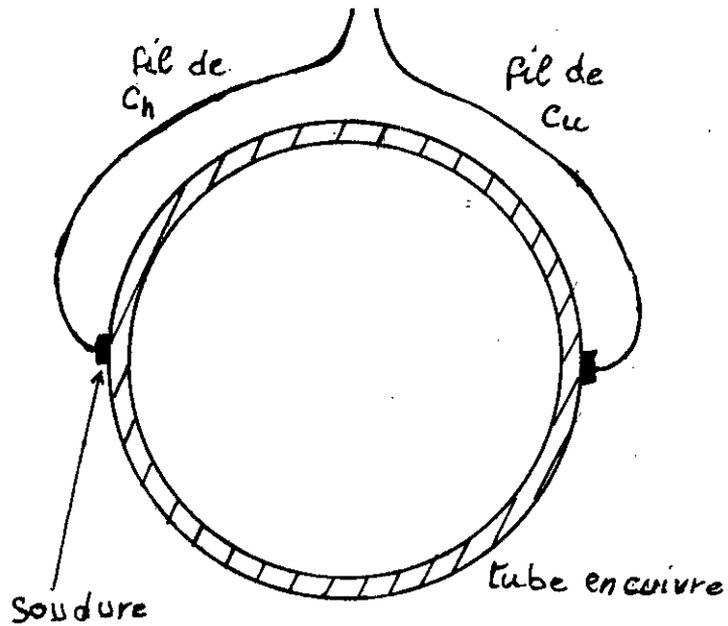
.../...

I.4 Mesure des temperatures

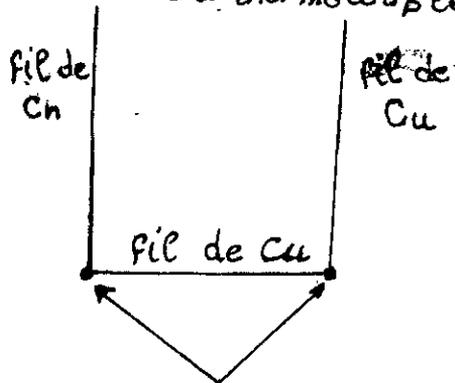
I.4.I Emplacement des thermocouple

Sept thermocouples (numerotés de I à 7) sont fixés à la paroi du tube en differents points.

Les 2 fils de chaque thermocouple sont soudé chacun à la paroi du tube en des points diametralement opposés



— coupe transversale du tube au point de fixation du thermocouple.



soudures à la même temperature.

— schéma simplifié

.....
...../.....

I.4.2 Determination des pannes

Pour la determination des pannes, nous nous sommes servis de multimetre pour effectuer des series de tests de continuité après cela, des ruptures de fils de thermocouple ont été localisés et ceci après avoir examiné avec soin chacune des gaines depuis le selecteur sur le panneau jusqu'au points de soudures (sources chaudes) des fils de thermocouple .

Pour ceux numerotés de I à 7/ en plus des ruptures de leurs fils, leurs fixations sur la paroi du tube ont cédé vue les conditions pénibles dans les quelles travaillaient ces soudures (les principales contraintes sont la temperature sur la paroi et les vibrations).

Problème du selecteur de thermocouples.

De faux contacts electriques ont etés decelés au niveau du selecteur de thermocouple duc à l'oxydation des surfaces metalliques. (voir schéma détaillé du selecteur de thermocouple ci après).

Pour remedier à ce problème, il nous a fallu demonter le selecteur, nettoyer les surfaces rouillées en se servant du papier abrasif, puis remonter tous les elements en prenant soin de bien regler le serrage de ces elements pour assurer d'une part I bon contact electrique entre les surface nettoyées et I selection des thermocouples *aisés*.

.../...

I.4.3 préparation des soudures chaudes (thermocouples de 1 à 7.

Vu le problème de manque d'oxygène - acétylène qu'a connu le département de génie mécanique durant quelques semaines nous nous vîmes contraint de chercher le procédé de soudage aussi efficace que le chalumeau .

En effet il s'agit de provoquer la fusion entre les métaux ~~cuisse~~ constantan pour que le contact entre ces derniers puisse être considéré comme parfait d'une part, d'autre part, la forme géométrique de la soudure obtenue est très importante pour la mesure de température avec précision.

Un autre point très important, est que le contact entre les deux Ca - Cn est théoriquement ponctuel d'où la nécessité de faire la séparation des fils jusqu'à se rapprocher le plus possible de la soudure.

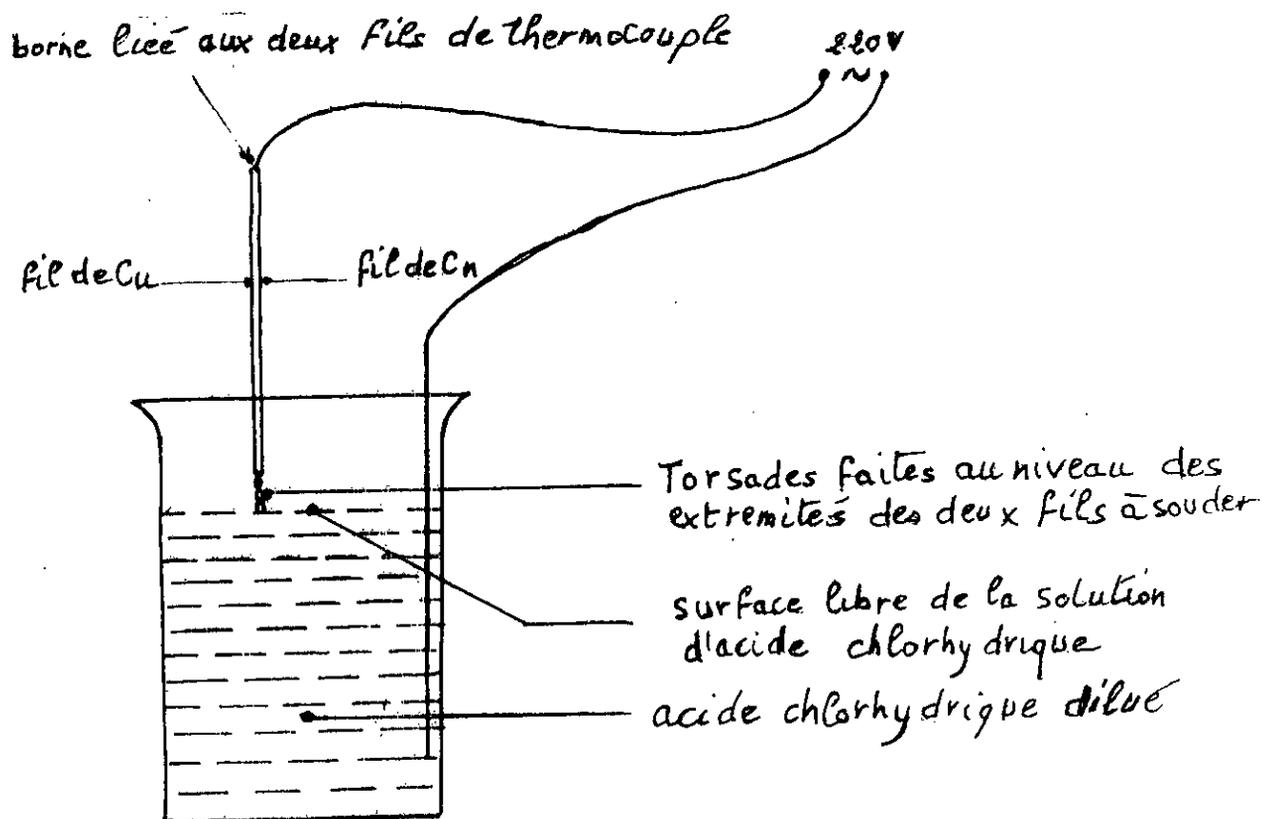
Leur isolation peut se faire avec du TEFLON pouvant résister jusqu'à une température de 260°C .

Soudage à l'acide chlorhydrique (mode opératoire)

Schéma du montage :

(Voir schéma du montage dans la page suivante).

.../...



Mode opératoire.

-Dénuder les deux fils de thermocouple et faire 1 torsade à leur extrémités.

Relier l'autre extrémité des deux fils, à une borne à 220 V et l'isoler avec 1 isolant pour des raisons de securite.

-Diluer dans 1 recipient de l'acide chlorhydrique prendre soins d'utiliser une solution très diluée puis augmenter progressivement la concentration en acide pour obtenir le resultat désiré.

-Plonger l'autre borne de l'alimentation en 220 V dans l'acide chlorhydrique.

Brancher au secteur 220 V et rapprocher les extrémités des deux fils assemblés de la surface libre de l'acide.

Au fur et à mesure que l'on effleure cette surface libre avec les deux pointes de fils, il se produit une étincelle électrique dont l'intensité dépend de la concentration de la solution en acide.

RESULTAT.

La soudure est à nu, de forme géométrique très régulière.

Avantage.

- Réalisation facile
- Grande vitesse de réponse

Inconvénients.

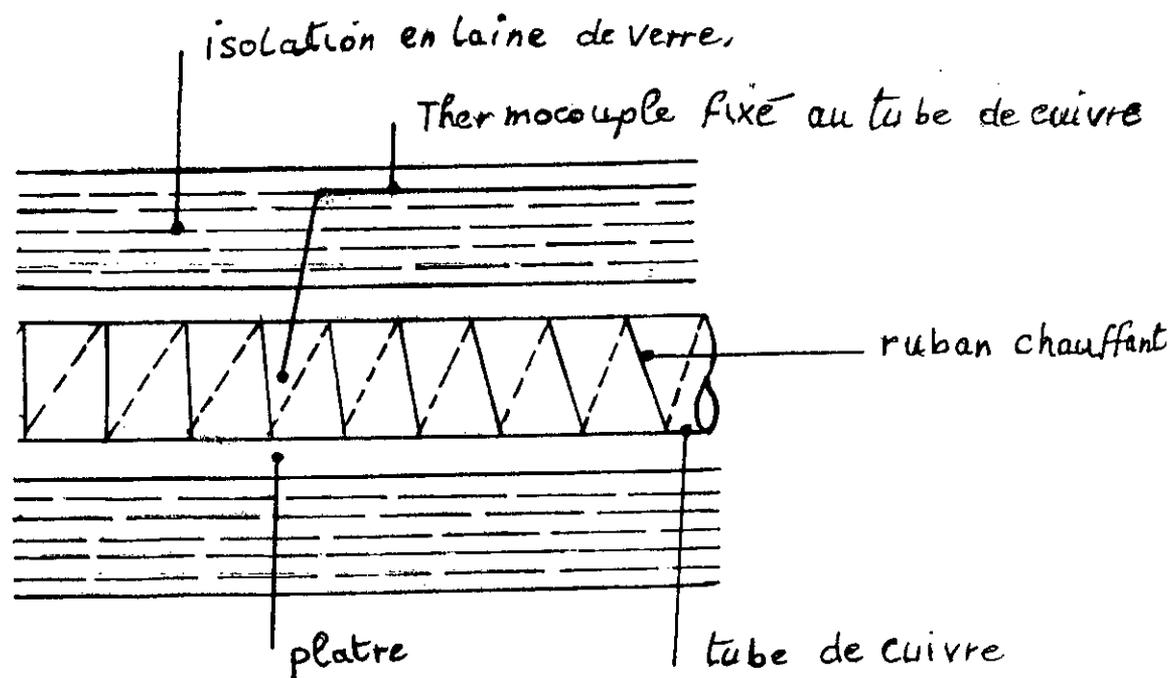
- Extrémités des fils et soudure non protégés contre l'oxydation et les chocs, d'où durée de vie réduite
- Manque d'étanchéité.

I.4.4 Fixation des thermocouples au tube.

La fixation des thermocouples au tube de cuivre a été faite comme suit :

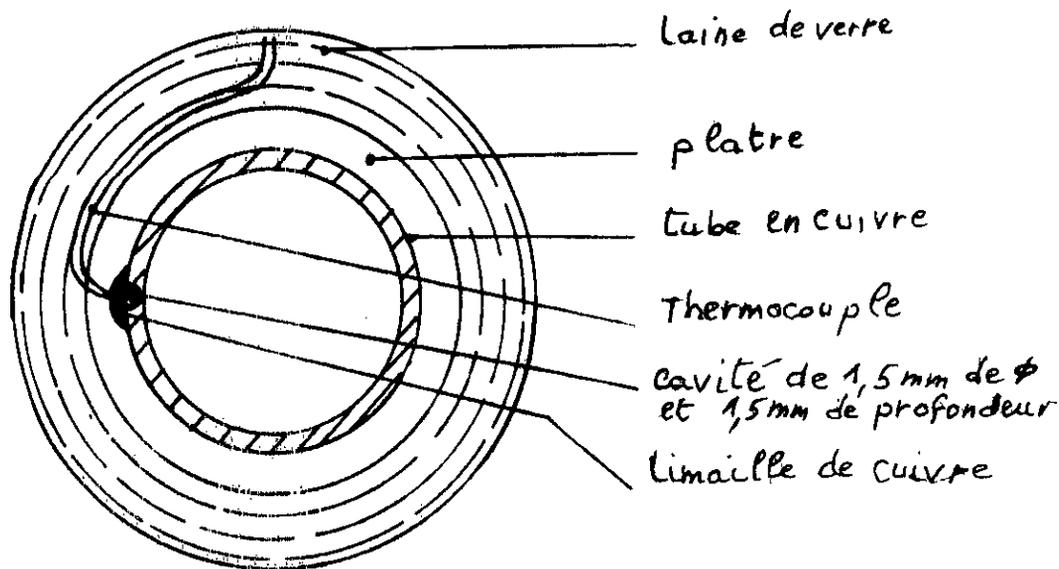
- À l'aide d'une foret de 1,5 mm de diamètre, on effectue un perçage de 1 mm de profondeur environ et ceci afin d'obtenir une cavité dans laquelle vient se loger la soudure chaude (jonction de mesure) du thermocouple.

La fixation est rendu meilleure en metant de la limaille de cuivre melangée à un peu de celle metallique (ARALDITE) sur le point de fixation du thermocouple et diminuerait la résistance de contact.



- Coupe longitudinale du tube d'essai

.../...



- coupe transversale du tube au niveau du point de fixation du thermocouple.

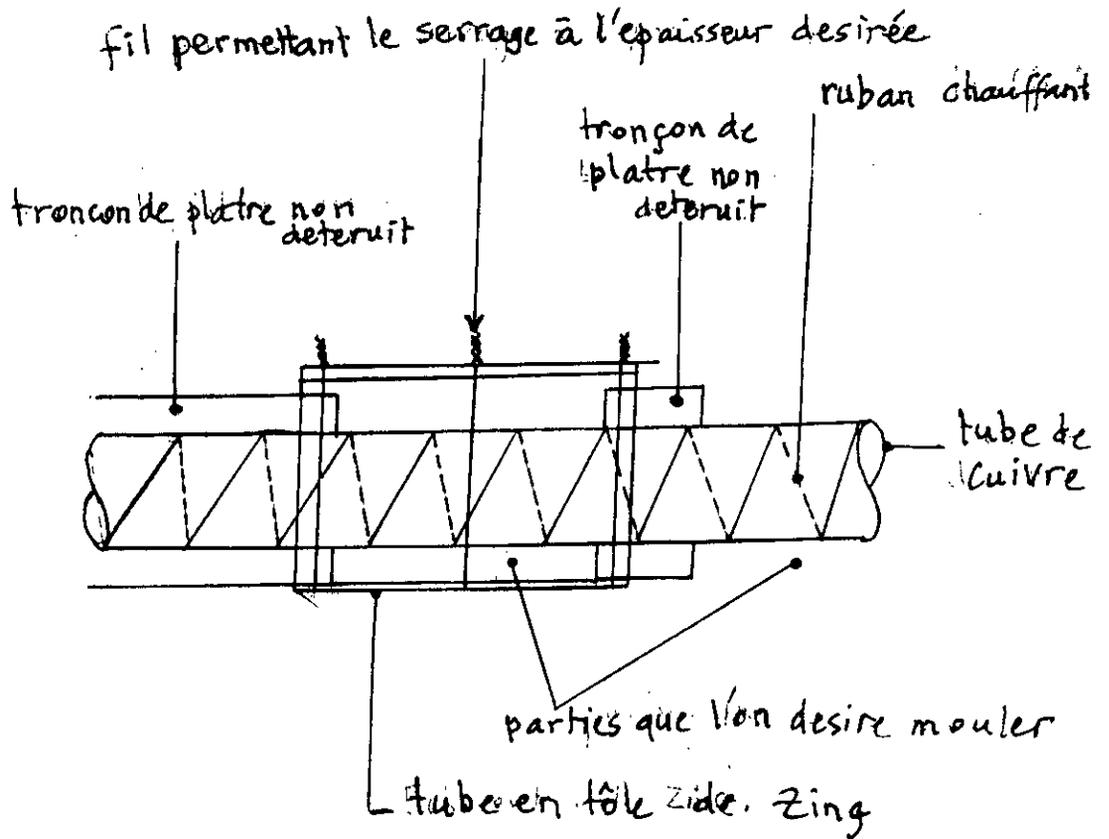
Moulage du plâtre.

Nous avons pris soin de conserver un tronçon de plâtre de 10 Cm de long environ à 1/2 mètre de l'extrémité libre du tube de cuivre.

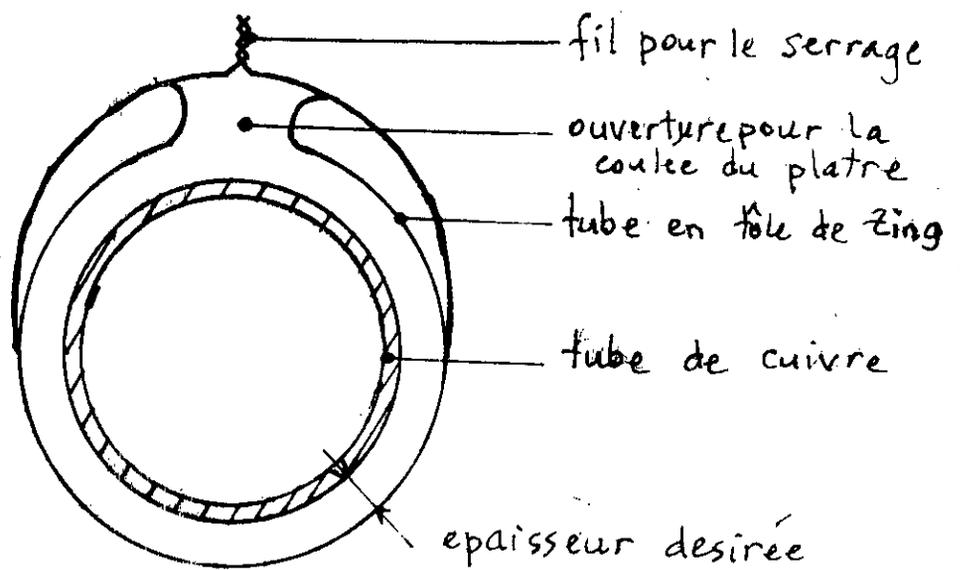
Il suffisait après cela de cisailier longitudinalement un tube en tôle de zing et de bien le serrer à ces extrémités aux tronçons de plâtre non détruit.

Après cela, nous avons préparé du plâtre jusqu'à l'avoir rendu très épais et versé celui ci jusqu'au trop plein du tube en tôle.

Ainsi nous étions sûrs que le plâtre occupait tout l'espace entre la tôle en zing et le tube de cuivre.



- COUPE LONGITUDINALE



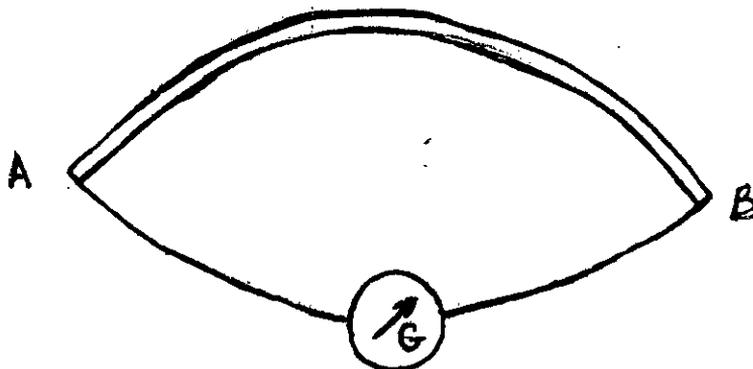
- COUPE TRANSVERSALE

- Schema du montage du tube en tôle de zing sur le tube en cuivre.

.../...

I.4.5 Thermocouples.

A. Principe de conception des couples thermoelectriques.



Si on soude ensemble les extrémités de deux fils en métaux différents et qu'on branche à leur extrémités libres un galvanomètre comme représenté sur la figure ci dessus, ce dernier ne décelera aucun courant si tous les points où les métaux dissemblables se joignent sont à la même température.

Mais si on chauffe ou si on refroidit l'une des soudures, le circuit sera parcouru par un courant électrique appelé courant thermoelectrique.

L'ensemble de fils dissemblables soudés ensemble comme indique ci dessus, constitue ce qu'on appelle un couple thermoelectrique.

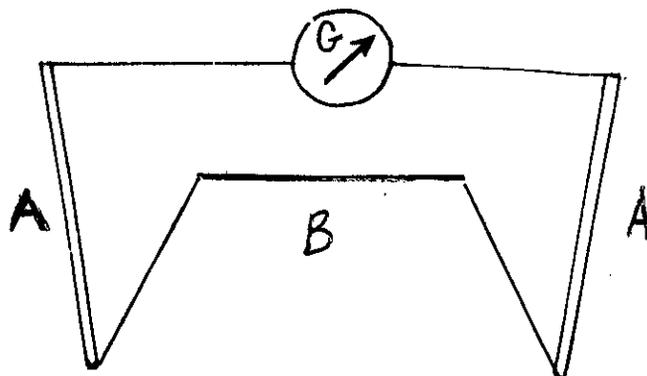
L'une des soudures dite de référence est maintenue à température constante (température de la glace fondante par exemple).

Cette température est dite référence. L'autre soudure dite de mesure est mise en contact thermique avec le corps dont on cherche à mesurer la température. pour mesurer la force électromotrice créée par les différences

des températures des soudures, on branche dans le circuit un millivoltmètre.

La valeur de la force électromotrice mesurée sert d'indication de la température du corps chaud.

B. Principe de branchement d'un thermocouple.



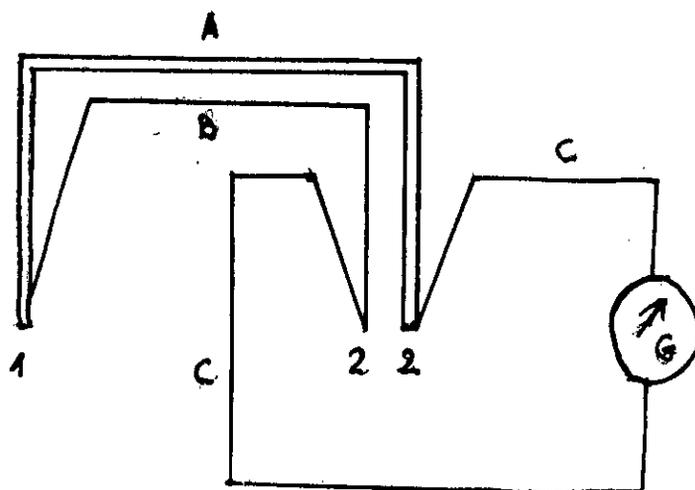
Comme est indiqué dans le schéma ci dessus, les fils A et B en métaux différents sont reliés au millivoltmètre par les fils en cuivre C.

L'une des soudures 1 et 2 peut faire office de soudure de référence ou de mesure.

Ce qui importe c'est que les points de soudure des fils A et B avec les fils de cuivre C, et les contacts de ces fils C avec le millivoltmètre se trouvent tous à la même température; s'il en était pas ainsi le circuit serait parcouru par un courant thermoélectrique supplémentaire faussant les mesures.

Un schéma de montage plus correct d'un couple thermoélectrique est représenté comme suit :

.../...



La soudure de référence 2,2 comporte en fait deux soudures, celle reliant le métal A au fil de cuivre et celle reliant le métal B à un autre fil de cuivre.

Ces deux soudures doivent être maintenues à température constante.

C. Décalage de l'origine des appareils à lecture directe.

Les galvanomètres à cadre mobile, montés en millivoltmètre à lecture directe et gradués directement en température sont très utilisés pour des mesures courantes, la précision exigée est rarement supérieure à 1% de l'étendue de l'échelle on peut donc se contenter de montage très simples.

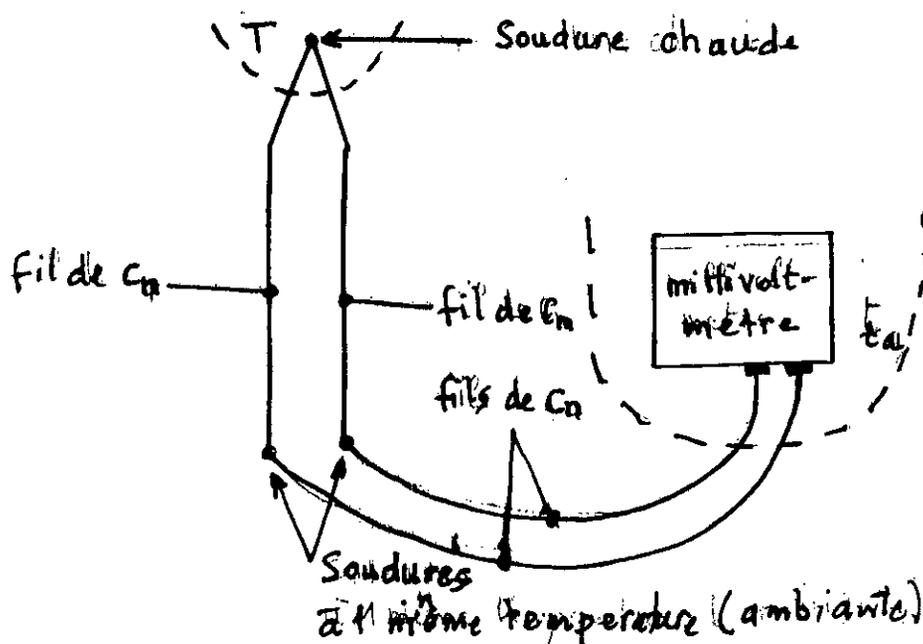
Les deux fils du couple thermoelectrique sont reliés directement aux bornes de l'appareil dont le zéro peut être décalé selon la température ambiante ce décalage peut être manuel ou automatique.

I.4.6 Montage proposé.integration D'I millivoltmetre

à affichage numérique et son etallonage.

Comme l'indiqué le schéma détaillé du selecteur de thermocouple le montage proposé est très simple.

Un schéma peut illustrer le branchement de chacun des thermocouples au millivoltmètre.



-Les soudures effectués dans le circuit sont à une même température donc il n'y aura pas naissance D'I d d p supplémentaire qui fausserait les mesures.

-Le millivoltmetre et ses bornes constitue la soudure froide ou de reference; l'ensemble est à une température constante t dite de référence.

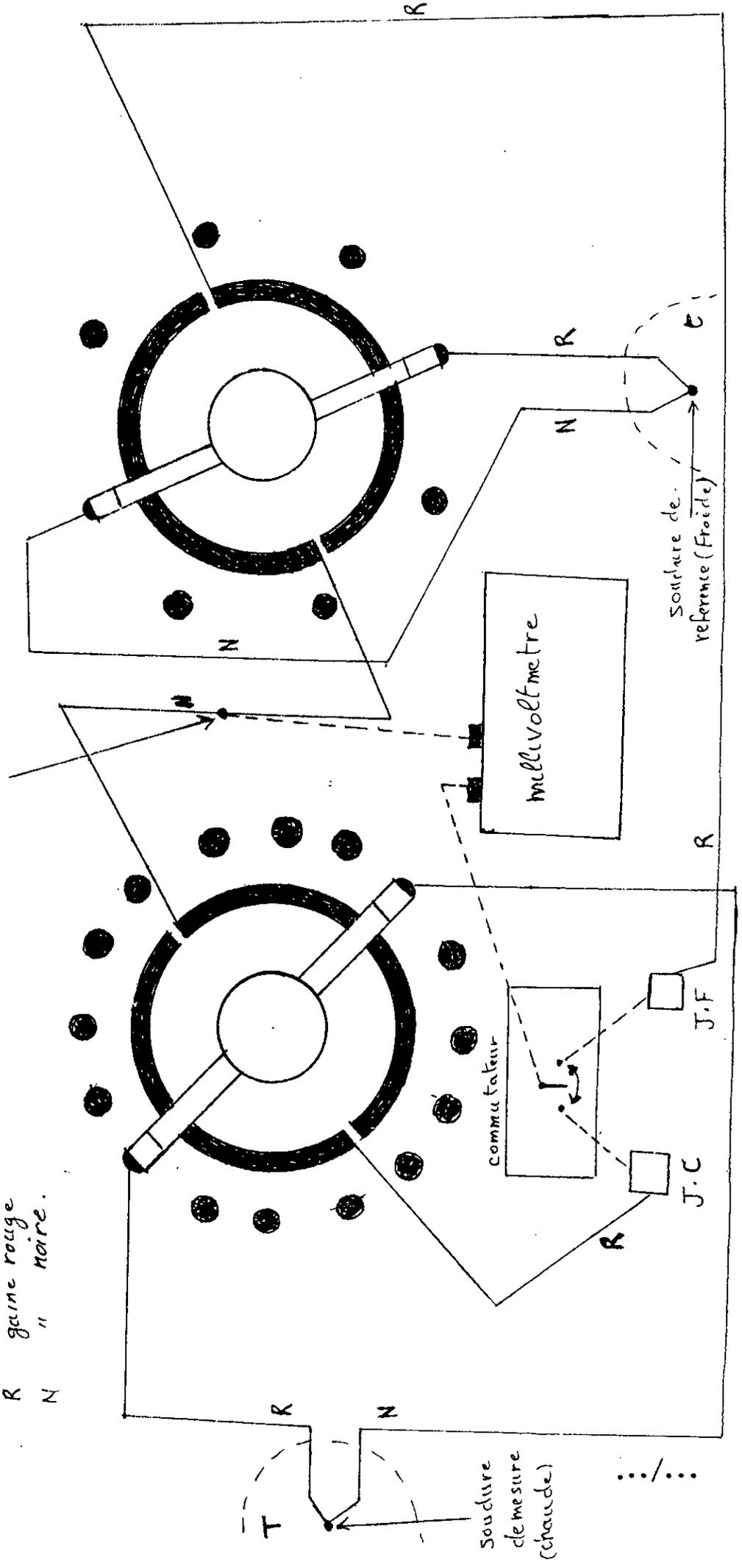
Etallonage du millivoltmetre.

La remise a zéro de l'appareil est obtenu en faisant le branchement de celui ci sur l'I des 3 thermocouples

- schéma illustrant la selection des thermocouples par l'intermediaire du selecteur sur le panneau. avec la nouvelle combinaison de circuits realises.

— circuit original
 - - - circuit realise
 R gaine rouge
 N " noire.

soudure.



Fixés sur la sonde de mesure de la température d'entrée ou est introduit également un thermomètre à mercure.

La température 0°C peut être reproduite avec une précision de 0,0001 °C à l'aide d'un mélange d'eau et de glace.

Il convient de broyer finement la glace, faire un mélange intime avec l'eau et d'attendre que l'équilibre entre les deux phases soit bien réalisé.

L'eau doit être déminéralisée ou distillée.

La profondeur d'immersion du thermocouple est d'environ 3/4 de la profondeur totale utilisée.

La glace est produite au département de génie chimique.

À l'aide d'un vis de réglage sur l'appareil on peut étalonner ce dernier à 0°C.

On peut suivre par la suite l'évolution de la caractéristique du thermocouple depuis 0°C jusqu'à 120 °C, température maximale que l'on peut atteindre en se servant d'une huile et qui malheureusement risque de déborder du vase dans lequel elle est chauffée ceci est produit en désirant aller au-delà de 120 °C. Pour contrôler les valeurs affichées par le millivoltmètre, nous avons utilisé un thermomètre à mercure très récent ainsi qu'un thermomètre électronique à soude.

Note importante .

Le millivoltmètre à affichage numérique doit être

raccordé à une alimentation en 220 V assez éloignée de celle du ventilateur en 380 V pour éviter les risques de chutes de tension se traduisant par des chutes de température affichées par cet appareil.

Il faut attendre plus de 30 MN pour que s'équilibrent les indications du millivoltmètre et du thermomètre à mercure.

A l'allumage, l'écart de température entre les deux est de 3 °C.

Le millivoltmètre affiche des températures avec:

moins de 1°C d'erreur	entre	0 et 50°C
2°C EN excès	entre	50 ET 90°C
2°C PAR défaut	entre	90 et 120°C

2. THEORIE

2.1 Introduction

Les connaissances de base de la théorie du transfert de chaleur par convection forcée ont une valeur considérable dans de nombreux domaines de l'art de l'ingénieur, y compris en particulier la conception des échangeurs de chaleur.

Cet appareil tequipement permet à l'étudiant de vérifier la théorie et formules associées à la convection forcée dans les tubes.

Les résultats expérimentaux servent à calculer le coefficient "h" de transmission de chaleur, le coefficient de frottement "f" du tube et divers nombres sans dimensions, tels que le nombre de Reynolds Re , le nombre de Nusselt Nu et le nombre de Stanton St .

On peut comparer les valeurs obtenues avec celles qu'on tire des formules empiriques admises et on peut évaluer la validité de l'Analogie de Reynolds.

2.2 Les différents modes de la transmission de la chaleur.

Le transfert de chaleur peut être défini comme la transmission de l'énergie d'une région à une autre sans l'influence d'une différence de température.

Comme les écarts de températures existent dans tout l'univers, les phénomènes d'écoulement de chaleur sont aussi universels que ceux associés aux attractions de gravitations.

Cependant, contrairement à la pesanteur l'écoulement de chaleur est régi non seulement par une relation unique mais plutôt par une combinaison de différentes lois physiques indépendantes. Les trois modes sont généralement reconnus dans la transmission de la chaleur : conduction, rayonnement et convection.

2.3 Convection forcée pour un fluide monophasique

2.3.1 Mécanisme de la convection.

On dit que l'on a un transfert de chaleur par convection; chaque fois que l'énergie thermique est transmise par le déplacement des particules fluides.

Les particules fluides chauffées au contact d'un corps chaud, ou d'autres particules à plus haut niveau thermique, viennent se refroidir au contact d'un corps plus froid ou d'autres particules à plus bas niveau thermique.

La transmission d'énergie thermique entre une particule et une autre particule ou une structure solide s'effectue par choc mécanique; à ce moment là; la transmission d'énergie entre les deux particules s'identifie à la conduction.

Chaque fois qu'il y a transfert par convection, le cheminement et la mobilité des particules fluides jouent un rôle important, dans la quantité de chaleur transmise par unité de temps.

La mobilité des particules sera mise en valeur par la viscosité du fluide.

Le cheminement des particules sera caractérisé par la vitesse moyenne des particules et par les dimensions caractéristiques de la conduite dans laquelle s'effectue l'écoulement.

On voit donc dès le départ quel rôle prépondérant jouera la mécanique des fluides dans l'étude de la convection.

Il existe deux types de transfert de chaleur par convection : la convection naturelle et la convection dite "forcée".

Lorsqu'il se produit au sein du fluide des courants dus simplement aux différences de densité résultant des gradients de température, on dit que la convection est naturelle ou libre.

Par contre si le mouvement du fluide est provoqué par une action externe, telle une pompe ou un ventilateur, le processus est appelé convection forcée.

Dans notre cas on a une convection forcée.

Dans la solution des problèmes de transmission de chaleur, il est nécessaire non seulement de préciser les modes de transmission de la chaleur qui entrent en jeu, mais aussi de déterminer si un

processus est stationnaire ou variable.

Lorsque le flux de chaleur dans un système ne varie pas avec le temps, C à D lorsqu'il est constant, la température en chaque point reste la même et les conditions du régime permanent prédominent.

En vertu des conditions du régime permanent, le flux de chaleur entrant en n'importe quel point du système doit être exactement égal au flux de chaleur sortant de sorte qu'il n'ya pas de variation d'énergie interne.

La plus part des problèmes techniques de transmission de chaleur se rapportent aux systèmes en régime permanent.

Ainsi l'écoulement de la chaleur à partir des produits de combustion vers l'eau des tubes d'une chaudière, le refroidissement par l'air environnant d'une ampoule électrique, ou la transmission de chaleur dans un échangeur thermique par le fluide chaud vers le fluide froid, constituent des exemples types.

L'écoulement de chaleur dans un système est transitoire, ou variable, lorsque les températures en différents points du système varient avec le temps.

2.3.2 Les régimes d'écoulement

Les principaux paramètres influant sur la nature de l'écoulement sont :

U : la vitesse moyenne

D : diamètre de la conduite

ν : la viscosité cinématique

Le régime d'écoulement est déterminé par le nombre de Reynolds.

Re = $\frac{UD}{\nu}$ inferieur à 2000 le regime est laminaire

Re = $\frac{UD}{\nu}$ superieur à 2000 le regime est turbulent.

2.3.3 Modèle de frottement en régime turbulent

Pour les tuyaux lisses, le coefficient de frottement f est donné par la formule de Von Karman

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = 4 \log_{10} (Re \sqrt{f}) - 0,4$$

A cause de sa forme implicite difficile à appliquer, on l'ai préfere la lois de blasius :

$$f = 0,079 Re^{-0,25}$$

Les lois de Von Karman et de Blasius sont confondues jusqu'à Re = 200.000.

Pour toutes les applications industrielles en tuyaux lisses, la loi de Blasius est suffisante.

2.3.4 Modèle de frottement en regime turbulent dans

les tuyaux rugueux.

Si ξ est la hauteur des asperités, et δ (s'etant l'epaisseur de la couche limite laminaire), le tuyau se comporte comme un tuyau lisse.

Au delà, le tuyau est dit rugueux et ce d'autant plus que ξ est plus éloigné de δ .

Le coefficient de frottement répond à la lois de Colbrook:

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = 2,28 - 4 \log_{10} \left(\frac{\xi}{D} + \frac{4,66}{Re \sqrt{f}} \right)$$

...?/...

2.35 Solution empirique (proposée par le constructeur)

Calcul et Théorie .

On peut diviser les calculs en six parties, correspondant aux paragraphes ci dessous;

I Débit massique

Débit massique d'air W en Kg /S

$$W = \rho \cdot a \cdot C_d \sqrt{\frac{2 D_p}{\rho}} \quad \text{Kg } \$/\text{S} \quad (1)$$

où ρ = masse volumique de l'air au diaphragme
(Kg / m³)

a = aire de l'orifice du diaphragme

C_d = 0,613 coefficient caracteristique du diaphragme
(~~N/m²~~)

I Mm d'eau vaut 9,81 N/M² .

2 Flux de chaleur

Puissance calorifique du ruban chauffant :

$$Q = \frac{I \times V}{1000} \text{ en Kj / S} \quad (2)$$

I en Amperes

V en Volts

Chaleur perdue à travers la garniture isolante :

$$Q_2 = \frac{0,0415}{1000} \times \frac{2 \pi \times 1,753}{\text{Log } \frac{r_e}{r_i}} D_t \text{ en Kj / S} \quad (3)$$

Dt = chute moyenne de temperature à travers la garniture isolante.

Flux de chaleur à travers la paroi du tube :

$$\frac{Q_1 - Q_2}{S} \text{ en KJ/m}^2 \text{ S} \quad (4)$$

S = aire de la paroi interieure du tube de cuivre.

on a besoin du flux de chaleur pour calculer h /
coefficient de transmission de chaleur.

La conduction de chaleur le long du tube de cuivre ne contribue pas au flux de chaleur puisque, pour une portion donnée du tube, la chaleur entrant à une extrémité est égale à la chaleur sortant à l'autre.

3) Temperature moyenne de l'air dans la portion choisie ;
il faut faire les calculs de transmission de chaleur pour la portion sous-traitée aux effets d'extrémités.

Il faut calculer la quantité de chaleur entrant par seconde à cet endroit et en déduire la temperature moyenne de l'air en ce même endroit.

La quantité de chaleur total comprend la chaleur produite par le ruban chauffant, plus la chaleur entrant par conduction dans le matériau du tuyau, moins la chaleur perdue à travers la garniture isolante chaleur amenée par conduction :

$$Q_3 = \frac{380,6}{1000} = x \frac{2 \pi \bar{r} t}{10^6} x \frac{\text{chute de temperature}}{\text{mètre}} \text{ en KJ /S}$$

Où : \bar{r} = rayon moyen du tube de cuivre, en mm
 t = épaisseur du tube en mm

Quantite de chaleur total entrant dans la section choisie :

$$(Q_1 - Q_2) \times \frac{b}{1753} + Q_3 \text{ en Kj / s} \quad (6)$$

Où b, en mm, est la longueur du tube chauffée jusqu'à la portion choisie.

Temperature moyenne de l'air :

$$T_b = T_A + \frac{\text{quantite de chaleur totale}}{\text{débit massique} \times C_p}$$

Où T_A = temperature de l'air a l'entrée

C_p = chaleur specifique de l'air à la temperature d'entrée.

4-coefficient de transmission de chaleur: pour h, coefficient de transmission de chaleur, on a

$$h = \frac{\text{Flux de chaleur}}{T_w - T_b} \quad (8)$$

La temperature de paroi T_w est donnée, soit par le thermocouple à l'endroit où on fait le bilan thermique ou bien par la courbe donnant la temperature de paroi en fonction de la longueur du tube.

5-valeurs experimentales de N_u , st et f;

I Nbre de Nusselt.

$$N_u = \frac{hd}{K} \quad (9)$$

2 Nombre de Stanton ;

$$st = \frac{h}{\rho v c_p} \quad (10)$$

3 calcul du coefficient de frottement f à partir de l'équation simple;

$$P_1 - P_2 = \frac{4fL\rho v^2}{2d} \quad (11)$$

Cette équation est fondée sur l'hypothèse que toute la chute de pression est due au frottement, pour l'écoulement dans un tube chauffé, cette hypothèse n'est pas valable car une partie de la chute de pression est due à la pression d'accélération engendrée par la détente de l'air dans son passage .

Le long du tube chauffé

Une évaluation de la pression d'accélération est donnée avec une précision raisonnable par l'équation

$$P_1 - P_2 = \frac{1}{\bar{\rho}} \left[\frac{W}{A} \right]^2 \left[\frac{4fL}{2d} + \frac{T_2 - T_1}{T} + \log \frac{P_1}{P_2} \right] \quad (12)$$

C'est l'équation de Guggenheim, dont la démonstration complète est donnée dans l'ouvrage HALL W.B " reactor heat transfer" Edite par "TEMPLEPRESS".

6 calculs de Nu, st et f à l'aide des formules en usage

$$Nu = 2,3 \cdot 10^{-2} \cdot Re^{0,8} \cdot Pr^{0,4} \quad (13)$$

$$St = 2,3 \cdot 10^{-2} \cdot Re^{-0,2} \cdot Pr^{-0,6} \quad (14)$$

$$f = 7,9 \cdot 10^{-2} \cdot Re^{-0,25} \quad (\text{Région turbulente seulement}) \quad (15)$$

$$\text{ou } Re = \frac{\rho v d}{\mu}$$

.../...

Le nombre du prandtl $pr = \mu c_p / k$ a presque la même valeur pour tous les gaz et varie très peu avec la température et la pression.

On trouvera dans l'annexe un tableau donnant les valeurs de μ, c_p, k et pr pour l'air sec à diverses températures.

L'analogie de Reynolds est fondée sur l'hypothèse que $Pr = 1$ et on peut écrire :

$$Nu = \frac{f}{2} Re$$

Puisque :

$$st = \frac{Nu}{Re_{pr}}$$

il s'ensuit que : $st = \frac{f}{2}$ (I7)

Si on porte cette valeur de st dans I4) et en prenant $pr = 1$ on obtient une autre formule d'où on peut tirer la valeur suivante de f :

$$f = 4,6 \cdot 10^{-2} Re^{-0,2}$$

On peut alors comparer les valeurs expérimentales avec les valeurs obtenues à l'aide de ces équations.

3. Expérience typique de transfert de chaleur par convection forcée

3.1 Objet

On détermine par voie expérimentale la validité de l'analogie de reynolds ($st = f/2$) pour l'air et on compare les valeurs obtenues au cours de cette expérience pour Nu , st et f avec les valeurs données par les formules empiriques.

3.2 Déroulement de l'expérience

On met en route le ventilateur et on ouvre a fond la vanne d'entrée.

on peut allumer ensuite le chauffage en laissant le transformateur réglable à zéro.

on fait croître la tension pour obtenir un courant maximal de 4,5 A environ.

Il faut laisser l'appareil chauffer pendant au moins 30 minutes pour que s'établissent les conditions de température stables.

On ne dépassera pas une température de 150 °C sur le tube (thermocouples de $\# 1$ à 7)

On fera alors les mesures suivantes :

- pression avant le diaphragme (pression du ventilation)
- perte de charge dans le diaphragme
- Température de l'air à l'entrée du tube cuivre
- Pression atmosphérique - température ambiante
- Perte de charge dans le tube d'essai
- Température des thermocouples du tube ($n^{\circ} 1 \text{ à } 7$).
- Température des thermocouples à l'intérieur et à l'extérieur de la garniture isolante ($n^{\circ} 8 \text{ à } 13$).

- Intensité de chauffage (ampéremètre)
- tension de chauffage (voltmètre).

Après changement de débit d'air et de puissance de chauffage; on doit attendre encore 15 à 30 minutes pour permettre à l'appareil d'atteindre un sur échauffement des thermocouples.

3.3 Mesures

- Temps d'attente pour faire les différentes lectures 1h30 mn.
- Température ambiante : 21 ° C
- pression atmosphérique : 763 mm de mercure.
- Température de l'air d'entrée : 33,5 ° C
- Pression du ventilateur : 299 mm d'eau
- perte de charge du diaphragme : 52,5 mm d'eau
- perte de charge dans la portion du tube en examen :
54,5 mm d'eau.
- courant de chauffage 5 A
- tension de chauffage 90,15 v

Le profil des températures le long du tube est donné par la courbe de la figure ci-après dans l'autre figure est tracée la courbe donnant la différence de température à travers l'isolant.

NUMÉRO du thermocouple	température réelle - °C	Différence de température à travers l'isolant °C
1	115	
2	48	
3	46	
4	46	
5	41	
6	39	
7	37	
8	129	} 66
9	63	
10	43	} 13
11	30	
12	40	} 5
13	35	

- Tableau illustrant l'ensemble de Résultats

.../...

3.4 calculs

3.4.1 Débit massique

pour calculer le débit massique, il est d'abord nécessaire de déterminer la masse volumique de l'air dans le diaphragme.

on opère comme suit : pression p de l'air dans le diaphragme :

$$p = \left[\frac{763 \times 13,36}{10^3} + \frac{299}{10^3} \right] \times 9,81 \cdot 10^3 = 104,43 \text{ KN/m}^2$$

Masse volumique ρ de l'air:

$$\rho = \frac{p}{R \cdot T} = \frac{104,43}{0,2871 \times 306,5} = 1,19 \text{ Kg/m}^3$$

$R = 0,2871 \text{ KJ/Kg}$ est la constante des gaz parfaits.

le débit massique est donc

$$W = 1,19 \times \pi (20,64)^2 / 10^6 \times 0,613 \times \sqrt{\frac{2 \times 52,5 \times 9,81}{1,19}}$$

d'où $W = 0,0287 \text{ Kg/s}$

3.4.2 Flux de chaleur

La quantité totale de chaleur fournie Q_1 , et la chaleur Q_2 perdue à travers la garniture isolante

sont comme suit :

$$Q_1 = \frac{5 \times 90,15}{1000} = 0,45 \text{ KW}$$

Différence moyenne de température à travers la garniture isolante. - soit le système d'équation :

$$(S_1) \begin{cases} 66 = \alpha \cdot (1,247)^2 + \beta (1,247) + \delta \\ 13 = \alpha \cdot (2,188)^2 + \beta (2,188) + \delta \\ 5 = \alpha \cdot (2,569)^2 + \beta (2,569) + \delta \end{cases}$$

.../...

$$(S_2) \begin{cases} 53 = -\alpha \cdot 3,232 - \beta \cdot 0,941 & (1) \\ 8 = -\alpha \cdot 1,812 - \beta \cdot 0,381 & (2) \end{cases}$$

$$(2) \rightarrow \beta = \frac{-\alpha \cdot 1,812 - 8}{0,381}$$

$$(1) \rightarrow 53 = -\alpha \cdot 3,232 + \alpha \cdot 4,475 + 19,758$$

$$\alpha = 26,743 \text{ } ^\circ\text{C}/\text{m}^2$$

$$\beta = -148,185 \text{ } ^\circ\text{C}/\text{m}^2$$

$$\gamma = 209,200 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$f(x) = 26,743x^2 - 148,185x + 209,200$$

$$A = \int_{1,247}^{1,922} (26,743x^2 - 148,185x + 209,2) dx$$

$$A = 28,73 \text{ } ^\circ\text{C} \cdot \text{m}$$

$$U = 234 \text{ V (catalogue)}$$

$$I = 5 \text{ A}$$

$$L = 1,753$$

$$U = RI \Rightarrow R = 46,8 \Omega$$

$$U' = 90,15 \text{ V}$$

$$I' = 5 \text{ A}$$

$$L' = ?$$

$$R' = \frac{U'}{I'} = 18,03 \Omega$$

$$L' = \frac{L \times R'}{R} = \frac{1,753 \times 18,03}{46,8} = 0,675 \text{ m (longueur chauffée)}$$

.../...

la différence de température moyenne à travers la garniture isolante :

$$\Delta T_m = \frac{28,73}{0,675} = 42,56 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$\begin{aligned} \varphi_2 &= 0,0415 \cdot \frac{2\pi \cdot 0,675}{L_n \frac{36,5}{17,5}} \cdot 42,56 = 10,19 \text{ W} \\ &= 0,01019 \text{ kW} \end{aligned}$$

le flux de chaleur vaut donc :

$$\text{flux de chaleur} = \frac{\varphi_1 - \varphi_2}{S'} = \frac{450 - 10,19}{\pi \cdot \frac{31,75}{1000} \cdot 0,675}$$

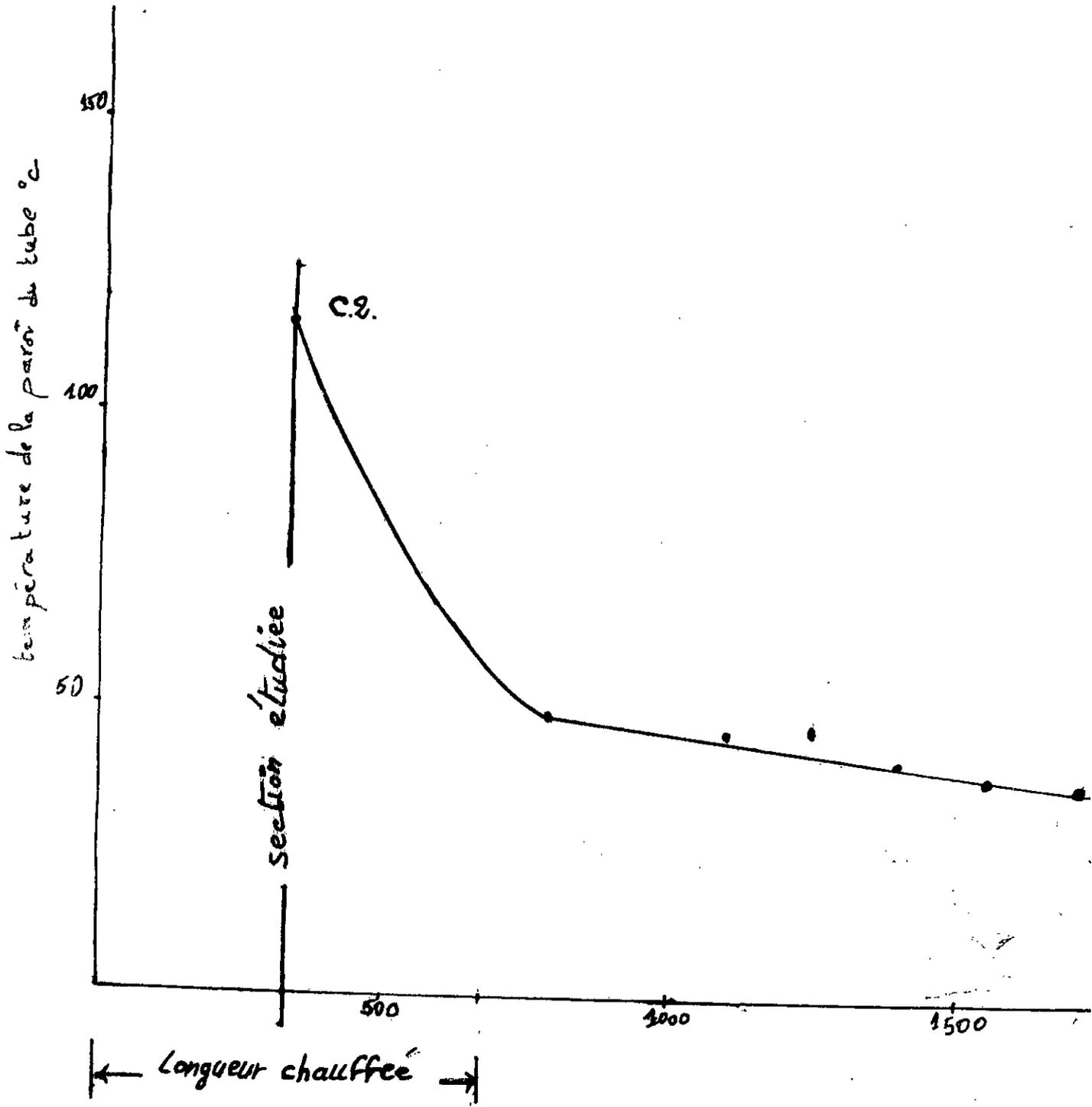
$$\text{flux de chaleur} = 6,53 \text{ kW/m}^2.$$

3.4.3 Température moyenne de l'air dans la section étudiée

La section choisie pour les calculs du bilan thermique se trouve entre les sections **A** et **2** c a d à **330** mm du début de la partie chauffée. Le gradient de température le long du tube est donné par la figure soit $12,03 \text{ } ^\circ\text{C/M}$ (de 2 à 7) la quantité de ~~chaleur~~ chaleur fournie par conduction qui est

La quantité de chaleur fournie par conduction φ_3 ne peut être évaluée mais reste négligeable.

.../...



La quantité totale de chaleur entrant dans la portion étudiée:

$$(450 - 10,19) \times \frac{330}{675} + 0 = 215 \text{ W} = 0,215 \text{ KW}$$

La température moyenne de l'air T_b : $35,96^\circ\text{C}$

$$T_b = 33,5 + \frac{215}{0,0287 \times 1003} = 35,96^\circ\text{C}$$

L'élévation de température de l'air est: $2,46^\circ\text{C}$

3.4.4 Coefficient de transmission de chaleur

La température de paroi dans la section étudiée: (voir figure)

Le coefficient local de transmission de la chaleur:

$$h = \frac{6,53 \cdot 10^3}{(115 - 35,96)} = 82,6 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$$

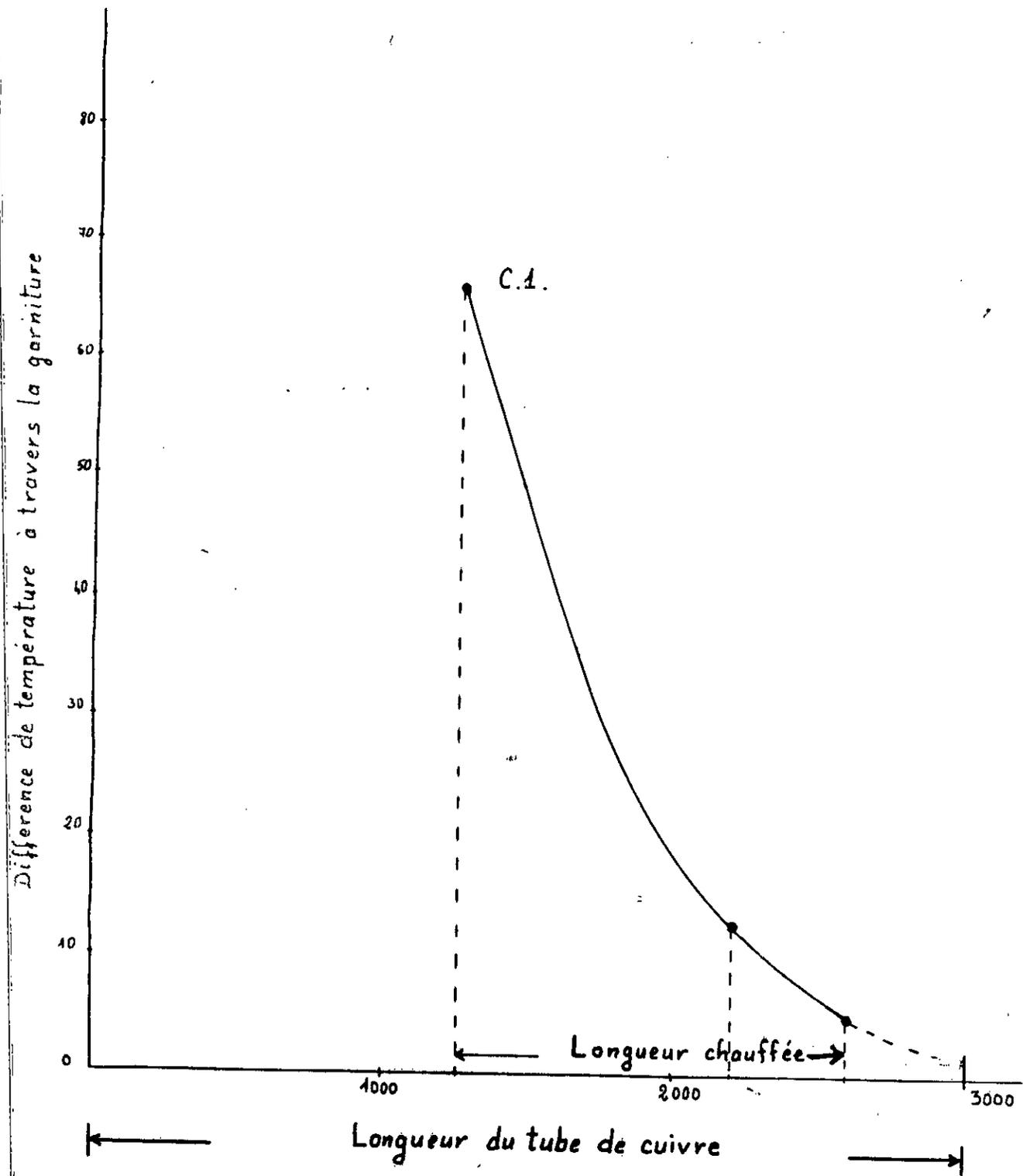
3.4.5 Valeurs expérimentales de Nu, St et f;

Pour calculer Nu, nous avons besoin de connaître la conductibilité thermique de l'air pour la température moyenne T_b ; (voir annexe)

nous tirons

pour une température de $35,96^\circ\text{C}$ de l'air

$$k_f = 0,027 \text{ W/m} \cdot ^\circ\text{C}$$



Différence de température à travers la garniture

On obtient alors le nombre de nusselt comme suit:

$$Nu = \frac{0,0826}{0,027} \times 1000 \times \frac{31,75}{1000} = 37,1$$

pour calculer St , il faut la valeur V de la vitesse moyenne.

mais il est plus commode de calculer la quantité à partir du débit massique W et de l'air A de la section droite du tube:

$$P\bar{V} = \frac{W}{A} = \frac{0,0284}{\frac{\pi}{4}(31,75 \cdot 10^{-3})^2} = 36,25; St_{exp} = \frac{82,6}{36,25 \times 1003} = 0,00227$$

Valeurs experimentales de f

calculs preliminaires:

-perte de charge dans la longueur en essai;

$$P_1 - P_2 = 1000 \times \frac{57,5 \times 9,81}{1000} = 0,564 \text{ KN/m}^2.$$

L'elevation de temperature le long des 1524 MM DU TUBE/

$$T_2 - T_1 = 2,46 \times \frac{1524}{330} = 11,36^\circ\text{C}$$

Temperature moyenne en degre kelvins:

$$\bar{T} = 273,2 + 33,5 + 2,46 \times \frac{178}{330} + \frac{11,36}{2} = 313,7 \text{ K}$$

Pression moyenne de l'air = pression atm + $(P_1 - P_2)/2$

$$\begin{aligned} \text{pression moyenne de l'air} &= \left[\frac{763 \times 13,56}{10^3} + \frac{57,5}{2 \cdot 10^3} \right] \times 9,81 \\ &= 101,78 \text{ KN/m}^2. \end{aligned}$$

Masse volumique moyenne de l'air :

$$\bar{\rho} = \frac{101,78}{0,2871 \times 313,7} = 1,13 \text{ Kg/m}^3$$

1. Calcul de f sans tenir compte de l'accélération

$$f = \frac{0,564 \times 1000}{2 \times 1,524} \times \frac{1,13 \times 31,75 \cdot 10^{-3}}{(36,25)^2} = 0,005$$

2. CALCUL de F tenant compte de la pression d'accélération

Deux calculs préliminaires supplémentaires sont nécessaires

$$\frac{T_2 - T_1}{T} = \frac{11,36}{313,7} = 0,036$$

$$\log \frac{P_1}{P_2} = \log \left[1 + \frac{P_1 - P_2}{P_{atm}} \right] = \log (1 + 0,005T) = 0,005$$

En utilisant l'équation de Guggenheim où on introduit les valeurs appropriées, on trouve :

$$\frac{0,564 \times 10^3 \times 1,13}{(36,25)^2} = \frac{2 \times F \times 1,524}{0,03175} + 0,036 + 0,005$$

ce qui donne :

$$f = 0,0046$$

3.4.6 Valeurs calculées de Nu, St et \bar{f} ;

Nombre de Reynolds :

$$Re = \rho \bar{v} \times \frac{d}{\mu}$$

d'après les tables. $\left. \begin{array}{l} \mu = 0,1907 \cdot 10^{-4} \frac{\text{kg}}{\text{m} \cdot \text{s}} \\ Pr = 0,703 \end{array} \right\} \bar{a} = 309 \text{ K}$

.../...

d'où :

$$Re = 36,25 \times \frac{31,75}{10^3} \times \frac{10^5}{1,907} = 60353$$

$$Nu = 0,023 (60353)^{0,8} (0,703)^{0,4} = 133$$

$$St = \frac{133}{60353} \cdot \frac{1}{0,703} = 0,00313$$

En suposant un ecoulement turbulent dans le tube, nous

f comme suit:

$$f = 0,079 (60353)^{-0,25} = 0,005.$$

Analogie de reynolds

Au moyen de l'anogie de reynolds, on peut calculer f,

par l'equation suivantes:

$$f = 0,046 (60353)^{-0,2} = 0,005$$

le but principal de l'analogie de reynolds est de permettre

le calcul du nombre de Stanton a partir de la valeur

experimentale du coefficient de frottement

on obtient:

$$St = \frac{0,0046}{2} = 0,00223$$

RESUME DES RESULTATS

- Quantité de chaleur totale fournie 0,45 KW
- Chaleur perdue à travers l'isolant 0,01019 KW
- Flux de chaleur ; 6,53 KW/m²
- Chaleur fournie par conduction à 330 mm... négligeable
- Chaleur fournie jusqu'à 330 mm 0,215 KW
- Température moyenne de l'air 35,96°C
- Coefficient de transmission de chaleur ... 0,0826 KW/m²°C.
- Coefficient de frottement expérimental ... 0,005
(compte non tenu de l'accélération)
- Coefficient de frottement expérimental ... 0,0046
(compte tenu de l'accélération)
- Coefficient de frottement calculé 0,005
- Nombre de prandtl à 330 MM 0,703
- Nombre de reynolds à 330 mm 60353
- Nombre de stanton expérimental 0,00227
- Nombre stanton calculé 0,00313
- St par l'analogie de Reynolds 0,00223
- Nombre de nusselt expérimental ; ; ; ; ; 97,1
- Nombre de nusselt calculé 133

.../...

4. Interpretation et Conclusion .

Nous avons obtenue pour le nombre de stanton une valeur de 0,00227 expérimentalement l'analogie de Reynolds qui permet de déterminer le nombre de stanton à partir du coefficient de frottement expérimentale conduit à St (analogie) = 0,00223 = 0,00223

On peut conclure que l'analogie de Reynolds est vérifiée avec une erreur relative de :

$$\frac{0,00227 - 0,00223}{0,00223} = 2\%$$

La valeur calculée du nombre de stanton (St(calculée) = 0,00312) est déterminée à partir des équations fondamentales définissant les nombres adimensionnels tel que Re , Nu , Pr, St et une corrélation empirique, celle de Dittus - Boelter pour la détermination du nombre de Nusselt lors de l'écoulement d'un gaz s'échauffant dans un tube lisse,

La condition du tube lisse n'est peut être pas remplie de façon très précise et l'écoulement peut être régi par cette loi que d'une manière approximative.

ANNEXE

VALEUR DE C_p , ν , K , et Pr POUR L'AIR;

$\frac{T}{K}$	$\frac{C_p}{KJ/Kg.K}$	$\frac{\nu}{Kg/m.S}$	$\frac{K}{J/m.S.K}$	$\frac{Pr}{-}$
247	1,002	$0,1603 \cdot 10^{-4}$	0,02231	0,719
274	1,002	$0,1743 \cdot 10^{-4}$	0,02457	0,711
302	1,003	$0,1875 \cdot 10^{-4}$	0,02664	0,705
330	1,006	$0,2004 \cdot 10^{-4}$	0,02872	0,699

BIBLIOGRAPHIE.

- Catalogue de l'appareil
- Technique de l'ingenieur
- Transmission de la chaleur (KREITH)
- Transmission de la chaleur (MC ADAMS)
- These de fin d'etude de //r AIDOUN / 1978
- Cours de Mecanique de fluide et gazo dynamique
de //r GARMOUSSE.

.../...

