

UNIVERSITE D'ALGER

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

DEPARTEMENT MECANIQUE

THESE DE FIN D'ETUDE S

ETUDES, ESSAIS ET MESURES

CRYOGENIQUES

ETUDIEE ET PRESENTEE PAR

L. AISSANI ET D. DENMAZARI

DIRIGEE PAR :

M.G. MATTON Docteur es sciences

Qu'il nous soit permis d'exprimer toute notre reconnaissance à Monsieur Gilbert MATTON qui nous a proposé cette étude et l'a suivie avec une bienveillante attention.

Que toutes les personnes qui nous ont apporté une aide constante acceptent tous nos remerciements.

B I B L I O G R A P H I E

J. M. KAY

Introduction à la mécanique des fluides et la
transmission de la chaleur

DUNOD

R. R. CONTE

Eléments de Cryogénie

MASSON et Cie

J. BURTON

Pratique de la mesure et du contrôle dans
l'industrie

Tome 2. DUNOD

G. MATTON

Transmission de la chaleur
Thermodynamique II - fascicule 2

Diffusion interne ENPA

G. LE MASSON

Les machines transformatrices d'énergie

Tome 2. DELAGRAVE

Technique de l'ingénieur

Mécanique et chaleur Tome 2.

Table des matières

	pages
- Introduction.....	1
-Présentation du sujet.....	2
CHAPITRE 1: ETUDE TECHNOLOGIQUE	
1-1-Réservoir d'alimentation	1
1-2-Les dégazeurs	2
1-3-Le by-pass	2
1-4-Turbine-débitmètre	3
1-5-Cylindre calorifugé	5
1-6-Les thermocouples	5
1-7-Calorifuge	7
1-8- Boa-inox	8
1-9-L'acier inoxydable	9
1-10-Mesure de débit gazeux	10
CHAPITRE 2: ETUDE THEORIQUE	
2-1-Introduction et définition de la convection.....	1
2-2-Etude thermique de l'isolation d'une ligne cryogénique.....	4
2-3-Calcul de la résistance chauffante	13
2-4-Calcul de la chambre de combustion	15
2-5-Calcul du réservoir de 70 litres	22
2-6-Calcul du serpentín	35
CHAPITRE 3 : ESSAIS ET MESURES	
3-1-Remplissage du réservoir de 130 litres	1
3-2-Mise en marche	2
3-3-Résultats obtenus pour l'azote	3
3-4-Remarques	4
CONCLUSION	

I N T R O D U C T I O N

Le mot cryogénie peut-être défini comme le synonyme de "technique des basses températures". D'une façon générale on appelle "basse température", toute température supérieure à -173°C environ.

La cryogénie représente l'ensemble des techniques ayant trait à la production, au stockage, à l'utilisation des gaz liquéfiés, appelés encore fluides cryogéniques.

Ces basses températures exigent une technique assez poussée du point de vue métallurgie et isolation thermique. En ce qui concerne les matériaux, une de leurs qualités essentielles est de ne pas être fragiles dans les conditions d'emploi ; sans quoi leurs caractéristiques de tenacité, si bonnes fussent-elles, ne serviraient à rien. Quant à l'isolation thermique, c'est un problème crucial et délicat qui se pose lors de la réalisation d'un appareillage de basses températures. En effet les écarts de température (air ambiant-fluides cryogéniques) sont très grands et la chaleur latente de vaporisation des gaz liquéfiés est faible.

De nos jours l'application des techniques cryogéniques a pris dans de nombreux domaines une extension considérable. Nous en citons quelques cas : le cryofrettage, le transport du gaz naturel, l'alimentation des moteurs fusées, les piles à combustibles...

PRESENTATION DU SUJET

L'étude consiste en la réalisation d'un circuit cryogénique superisolé (perlite sous vide) afin de mesurer le gradient de température et de relever le débit de G.N.L. évaporé.

Ceci nous conduit à considérer plusieurs aspects des problèmes de la cryogénie :

a) Problèmes technologiques

- stockage : le circuit sera alimenté par un réservoir de 40 litres
- mesures de températures, utilisation des thermocouples pour basses températures ; fixation de ces thermocouples par brasure.
- purge : utilisation de robinets cryogéniques.

Et d'une façon générale utilisation des aciers austénitiques qui eux aussi ont fait l'objet de brasures et soudures.

b) Ecoulement du G.N.L.

- calcul des débits
- calcul des coefficients de convection.
- calcul Re , Pr

Ces calculs essentiellement thermiques, nous permettent de déterminer le flux échangé avec l'air ambiant.

c) Utilisation du G.N.L.

- calcul d'une chambre de combustion alimentée au G.N.L.
- calcul de la masse de G.N.L. en fonction de la richesse avec comme paramètre la masse d'air.
- choix de l'injecteur avec comme paramètres la pression amont et le nombre de trous.
- flux de chaleur échangé entre le G.N.L. et l'air avec comme paramètre la température de ce dernier.
- calcul d'un serpentin pour l'alimentation d'un moteur R 16.
- calcul d'un réservoir de 70 l refroidi à l'azote liquide afin d'éviter toute évaporation de G.N.L.

Avec l'ensemble de ces points, nous aurons une vue générale sur les possibilités du G.N.L. tant du point de vue **stockage** que **transvasement**.

ETUDE TECHNOLOGIQUE

L'installation telle que nous l'avons réalisée comprend plusieurs éléments que nous nous proposons d'étudier séparément.

1.1. Réservoir d'alimentation

C'est un réservoir CRYO-U

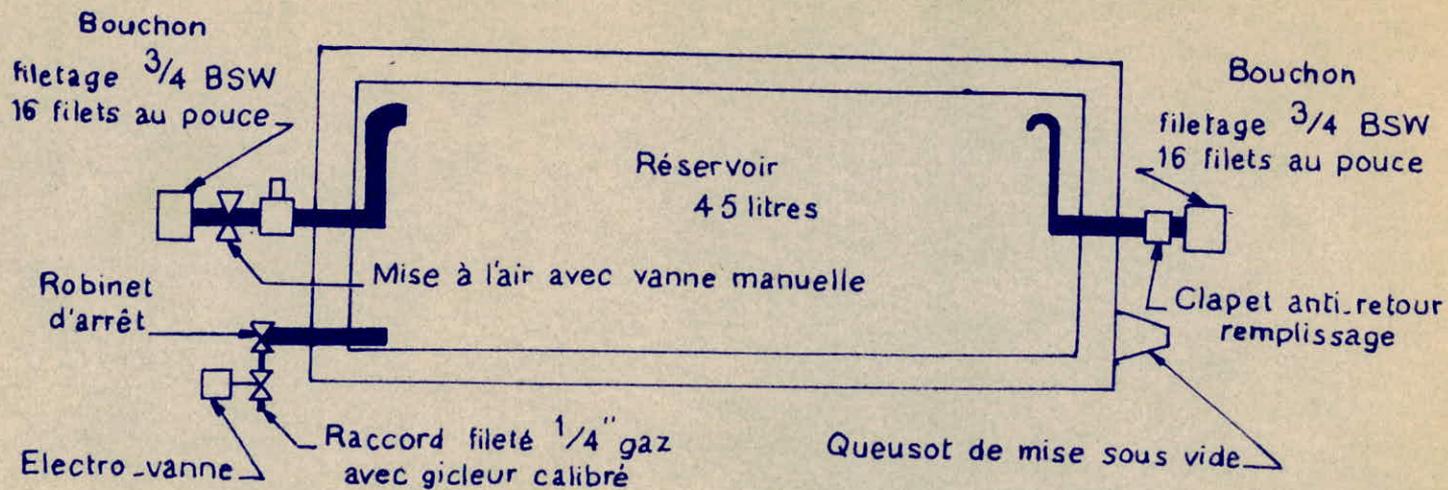
L'appareillage inclus dans la dénomination CRYO-U comprend :

- un réservoir contenant le gaz naturel liquéfié
Il est entièrement réalisé en acier 18/8 inoxydable et comporte une double enceinte dont l'inter-paroi est isolée sous vide, afin de limiter les entrées de chaleur.
- un robinet d'arrêt pour le GNL
- une électrovanne dont la tension d'alimentation est de 24 volts.

Remplissage du réservoir

Le remplissage s'effectue obligatoirement orifice de mise à l'air ouvert, par le raccord de remplissage muni d'un clapet anti-retour (voir planche). Un tuyau flexible équipé de raccords assure le transfert du liquide du réservoir ravitailleur vers le réservoir CRYO-U. On stoppe l'opération lorsque le liquide coule franchement par l'orifice de mise à l'air. On ferme la vanne de mise à l'air. On ferme la vanne de mise à l'air puis la vanne du réservoir ravitailleur. On débranche le flexible de remplissage et pour terminer, on revisse les bouchons sur le clapet anti-retour et sur la vanne de mise à l'air.

SCHEMA DU RESERVOIR



1.2. Les dégazeurs

Ils sont au nombre de deux. Chacun d'eux se présente comme un cylindre de $\varnothing 23/27$, constituant le corps principal sur lequel sont brasés latéralement deux tubes de $\varnothing 12/6$ et filetés aux bouts.

Sur la partie supérieure de ce corps vient se fixer un tube de $\varnothing 8/6$ et de 100 de longueur sur lequel est brasé le robinet cryogénique servant de purgeur.

Le corps comporte aussi à ses deux bouts deux pastilles brasées. L'ensemble est fait en acier inoxydable 18/8.

Comme son nom l'indique le dégazeur sert au dégazage du G.N.L. lors de son admission dans le circuit, afin d'éviter l'écoulement à deux phases.

Il reçoit le G.N.L. par le tube latéral supérieur. La séparation des deux phases se fait par gravitation. Le liquide est évacué par le tube latéral inférieur vers le circuit. Le gaz s'échappe lors de la purge.

1.3. Le Bypass

Le Bypass consiste en un circuit monté en parallèle à la turbine. Lors de la mise en froid du circuit, nous avons deux étapes : écoulement en phase gazeuse et juste après écoulement en deux phases.

Dans ce cas le b.y-pass permet d'éviter le passage de ces deux types d'écoulement dans la turbine : c'est un appareil de mesure assez fragile. D'autre part comme elle est faite pour fonctionner en phase liquide seulement, on évite ainsi qu'elle ne s'emballe.

Le b y-pass est constitué d'un robinet cryogénique et d'un BOA inoxydable de \varnothing 12.

L'utilisation du BOA permet d'avoir un montage qui est assez souple et facilite ainsi la fixation de la turbine.

1.4. Turbine -débitmètre.

Les mesures de débit de liquides sont assurées à l'aide de deux appareils distincts :

- le mesureur : organe mécanique sans chambre, mis en rotation par la circulation du liquide, transformant cette rotation en un signal électrique.
- le compteur : appareil électronique amplifiant ce signal pour assurer la lecture du débit instantané et la totalisation du volume écoulé.

Les turbines se distinguent par les caractéristiques suivantes :

- précision sur la quantité de liquide mesuré
- réalisation en AUAG.
- résistance à l'agressivité des liquide (acides), aux contraintes thermiques (gaz liquéfiés), aux coups de béliers, surpressions, vibrations.
- températures admises - 220° C à 150°C.
- aucune lubrification n'est nécessaire.

Voici un tableau donnant les caractéristiques mécaniques des turbines que nous avons utilisées.

TURBINES	A 937	A 1340	
Longueur hors tout du corps	64,5	64	mm
∅ int canalisation	6	10	mm
∅ du corps	25	30	mm
∅ et pas de l'orifice	12.100	18.150	mm
Poids	150	190	g

1.5. Cylindre calorifugé

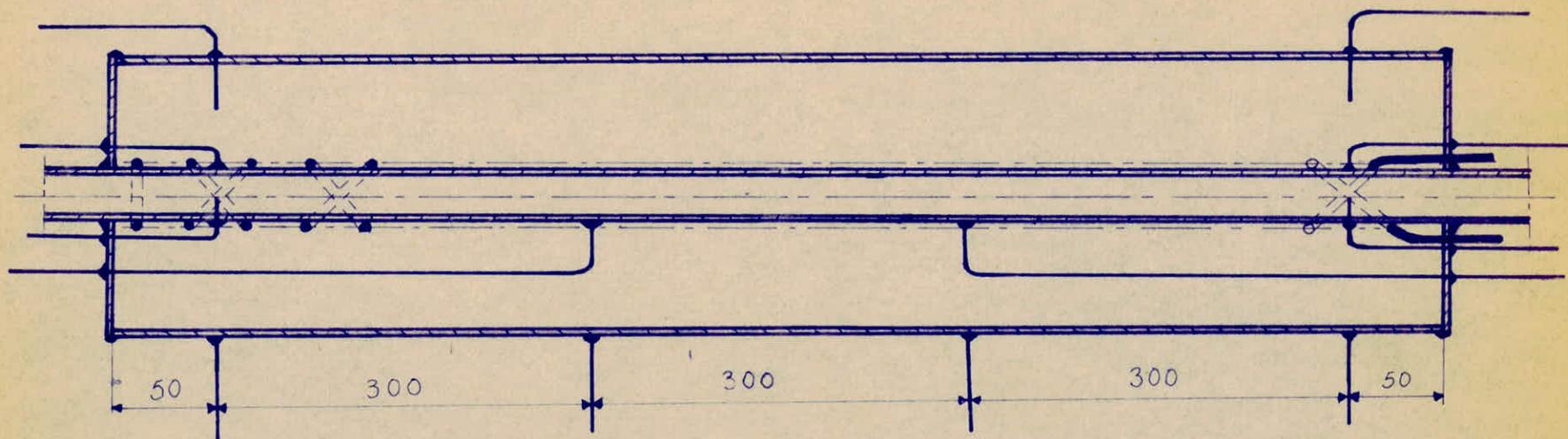
Il se compose d'un tube de \varnothing 6/8 dans lequel se fait l'écoulement du G.N.L. Ce tube traverse un second tube de \varnothing 50/53 et de longueur un mètre, et fermé à ses extrémités par deux pastilles soudées sous argon. Ce dernier tube est rempli de perlite afin d'isolation thermique. Il est aussi possible d'y faire le Vide pour étudier les écoulements en superisolation.

L'ensemble comprend aussi une résistance en thermo-coax chauffant enroulée autour du tube de petit diamètre. Cette résistance sera calculée un peu plus loin. Elle nous permettra de tracer une courbe d'étalonnage de la masse de gaz évaporé en fonction du flux de chaleur qu'elle aura dégagé.

La quantité de flux de chaleur qui passe de l'air ambiant au G.N.L. est connue par la mesure du gradient de température. Cette mesure se fera à l'aide de thermocouples.

1.6. Les thermo-couples

Les mesures de températures à l'aide de thermo-couples présentent l'avantage d'allier un encombrement très faible à une grande simplicité d'utilisation. Les deux types de thermo-couples qui seront utilisés sont le fer-constantan et le chromel-alumel.



SCHEMA DE DISPOSITION DES
THERMOCOUPLES

Le Fer-Constantan (FKAC) utilisable de -190 à + 860 C; le sensibilité de ce thermo-couple varie entre 30 et 60 uV/deg. Bien que ses propriétés **mécaniques** ne soient pas très bonnes, le thermo-couple fer-constantan possède une bonne tenue en atmosphère réductrice. Par contre, il ne doit pas être utilisé sans protection en atmosphère oxydante.

Le Chromel-Alumel utilisable de 0 à 1350 °C. La sensibilité de ce thermo-couple est d'environ 40 uV/deg. Sa courbe F.E.M. en fonction de la température est pratiquement linéaire.

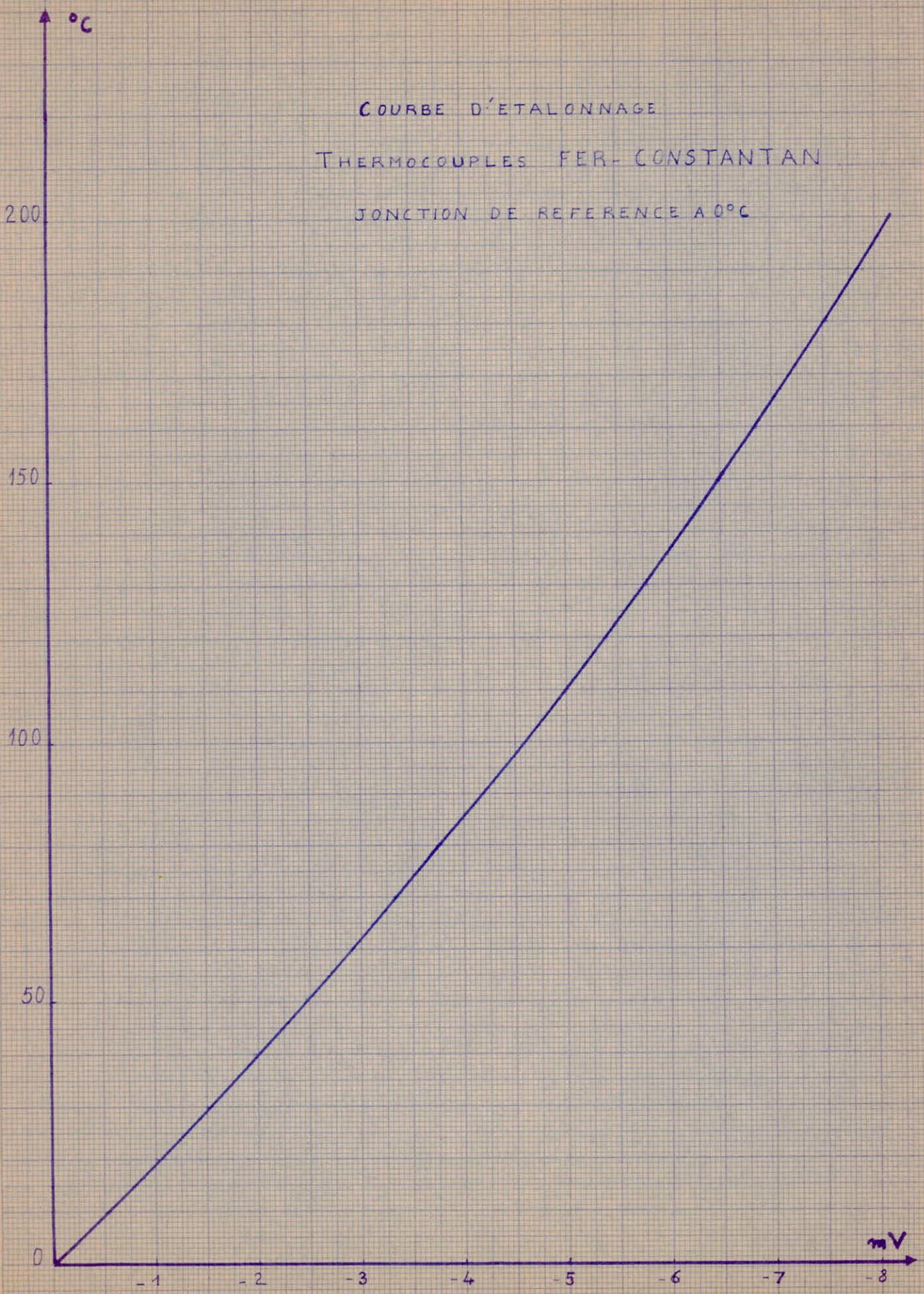
1.6.1. Préparation et contrôle des thermo-couples (thermo-coax)

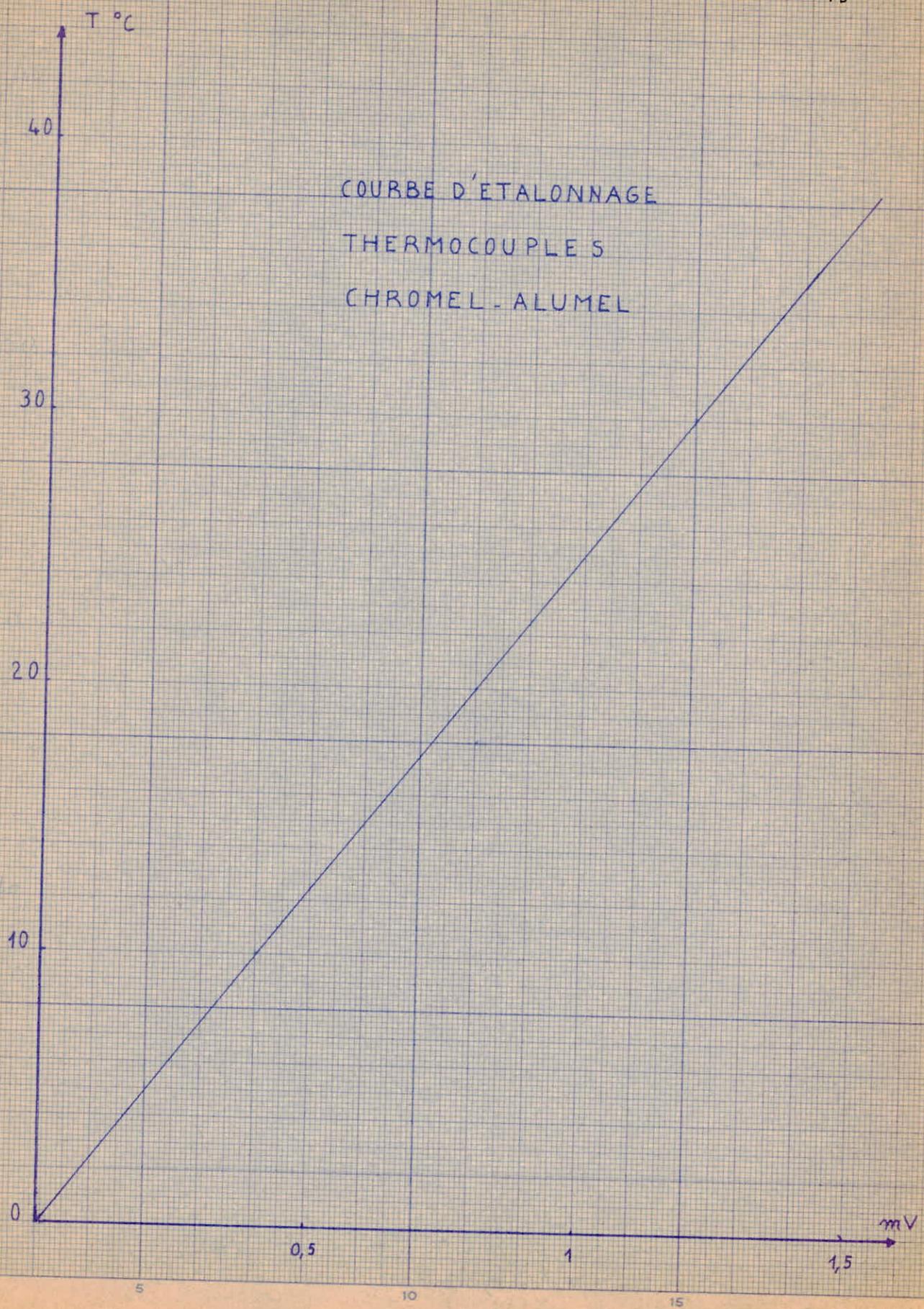
Les thermo-couples qui sont utilisés dans notre montage se présentent sous forme de deux fils entourés d'une gaine. Les extrémités sont soudés d'une part sur le tube et d'autre part au fil de compensation.

Il est à noter qu'il ne nous était pas possible de braser ces thermo-couples du fait de la finesse de leur diamètre. Ils chauffaient au rouge avant que la brasure ne soit prête ; aussi leur fixation a été faite par sondage à l'étain.

Pour raison d'économie (les thermo-coax coûtent chers) et de commodité de fixation les fils de thermo-coax sont reliés à des fils de compensation. Cette liaison se fait par points de soudure sur des fiches.

COURBE D'ETALONNAGE
THERMOCOUPLES FER-CONSTANTAN
JONCTION DE REFERENCE A 0°C





COURBE D'ETALONNAGE
THERMOCOUPLES
CHROMEL-ALUMEL

1.7. Calorifuge

L'isolation par poudres consiste à placer de fines particules de matériaux entre les parois aux températures T1 et T2. Ces particules, peuvent être des microsphères de plastiques, de carbone, de silicate de calcium, etc. ; mais les composés les plus utilisés et aussi ceux qui ont été les plus étudiés sont la perlite et le silico-aérogel.

La taille des particules varie de 100 à 200 microns. La conduction à travers ces différents types d'isolants est en général plus faible qu'à travers les mousses, les contacts entre les particules étant très petits. De plus, ils offrent l'avantage de ne pas permettre le givrage de l'enveloppe extérieure en cas de rupture du vide.

Dans notre montage nous utilisons de la perlite dont les caractéristiques sont les

suivantes :	$\rho = 96 \text{ kg/m}^3$
sous air	$\lambda = 27,4 \cdot 10^{-3} \text{ Kcal/m.h}^\circ\text{C}$
sous vide	$\lambda = 9,5 \cdot 10^{-4} \text{ "}$

1.8. Boa-inox

La liaison des divers éléments du montage se fait par des tuyaux en boa inox fabriqués à partir d'un tube cylindrique en acier inoxydable, ces tuyaux doivent leur flexibilité à la formation d'ondulations obtenues par déformation du métal.

Ne comportant aucun élément, autre que du métal, utilisé sous forme de tube et plissé, le tuyau boa présente les avantages suivants :

- étanchéité totale, due à l'absence de joints tels que le caoutchouc, l'amiante et le coton.
- flexibilité remarquable et constante, se maintenant même sous les pressions les plus hautes.
- Résistance à la pression, à la chaleur puisque entièrement métallique, à la torsion puisque ne comportant aucun agrafage.
- facilité de montage par l'utilisation possible de raccords ou de brasure, mais

Ce dernier mode présente l'inconvénient d'être indémontable.

1.9. L'acier inoxydable

Le système entier est fait en acier inoxydable NS20E avec C = 0,1 %, Cr=18 %, Ni=7,5 %.

Il est désigné par la norme AFNOR par Z 10 CN 18,08, c'est un acier qui ne subit pas de transition brutale ductile-fragile. Il offre une bonne résistance à la corrosion par les agents atmosphériques. Ses caractéristiques à l'état écroui,

sont acceptables. Il peut-être soudé à l'arc électrique avec métal d'apport (UGINARC MK2 ou MKS1), sous atmosphère inerte (argon) ; il peut faire l'objet de brasure à l'argent. Sa température de fusion est $t_f = 1450^\circ\text{C}$. Le soudage de l'acier inoxydable 18-8 présente certains avantages :

- aucun traitement n'est nécessaire après soudage :
- * cet acier n'étant pas employé dans un milieu où la corrosion intercrystalline est à craindre.
- * ses caractéristiques sont équivalentes à celles du métal recuit.
- il est apte à être assemblé avec d'autres matériaux.

Par contre son **usinage** se révèle très difficile du fait de sa dureté. Nous donnons ici quelques unes de ses caractéristiques qui nous serviront dans les calculs :

$$\lambda = 0,020 \text{ Cal/cm s } ^\circ\text{C à } - 200^\circ\text{C}$$

$$\lambda = 0,025 \text{ cal/cm s } ^\circ\text{C à } - 100^\circ\text{C}$$

1.10. Mesure de débit gazeux

Dans notre montage nous utiliserons 2 sortes de débit-mètres. L'un à capillaires et l'autre à plan incliné.

1.10.1. Débit-mètre à capillaires

Il sert à la mesure des faibles débits ; lorsque il n'y a pas apport de chaleur au G.N.L. par la résistance chauffante et que l'évaporation est dûe uniquement au flux de chaleur naturelle.

Ce genre d'appareil met en application la loi de Poiseuille, suivant laquelle l'écoulement laminaire d'un fluide dans un capillaire nécessite une pression motrice proportionnelle au débit et à la viscosité du fluide.

Les capillaires de notre débit-mètre sont étalonnés pour de l'air ; pour connaître la valeur d'un débit d'air en l/h, il suffit de multiplier la dénivellation totale du manomètre, comptée en millimètre, par la constante d'étalonnage KA gravée sur le capillaire (ou par la somme des constantes des capillaires en circuit sur le débit-mètre type 0459600 à capillaires multiples).

S'il s'agit de mesurer le débit d'un gaz autre que l'air, mais de viscosité voisine de celle de l'air, on utilisera une constante d'étalonnage KG, obtenue en multipliant la constante KA par le rapport des viscosités de l'air et du gaz en question (azote 1,03).

Si le gaz est très peu visqueux (hydrogène ou hydrocarbure) l'écoulement n'est plus tout à fait laminaire. Dans ce cas, il faut refaire un étalonnage particulier, par exemple à l'aide d'un débit-mètre à bulle de savon (ceci nous n'avons pas pu le réaliser par manque de matériel).

Débit-mètre du 045 9600

Ce débit-mètre sera utilisé dans notre montage.

Il a les caractéristiques suivantes :

- échelle manométrique de 100 mm
- sera garni d'eau avant emploi
- les 3 capillaires ont pour constantes KA respectives 0,1 ; 0,2 ; 0,3 donnant par combinaison les domaines de mesures suivants : 0 à 10, 0 à 20, 0 à 30, 0 à 40, 0 à 50, et 0 à 60 l/h.

1.10.2. Débit-mètre à plan incliné

Sera utilisé quand en plus du flux naturel de chaleur, on a un autre flux fourni par la résistance chauffante. La mesure se fait par variation de pression. L'appareil se compose de 2 dispositifs mécaniques réunis par des tubes de liaison.

- un organe déprimogène créant la différence de pression
- un appareil de mesure pour mesurer en permanence. Cette différence de pression et pour donner automatiquement la valeur du débit instantané.

L'organe déprimogène dans notre montage est un diaphragme. C'est un joint plein très mince, percé d'un trou dont le centre coïncide avec l'axe de la conduite. On mesure la différence de pression entre les 2 faces.

L'appareil de mesure de différence de pression est un manomètre à réservoir et à tube incliné. Cette inclinaison permet, pour une même variation de pression d'augmenter le déplacement du niveau et de là, augmenter la sensibilité.

Le réservoir est rempli d'alcool et le tube est gradué en mm d'eau.

C'est un débit-mètre que nous avons eu à étalonner (voir courbe d'étalonnage planche fig 4). Pour cela on le monte en série avec un autre dont les caractéristiques sont connues mais uniquement pour de l'air. Pour l'utilisation du G.M.L. nous devons déterminer un facteur de correction.

Soient Q le débit en volume

D le diamètre intérieur de la conduite
 d le diamètre de l'orifice du diaphragme.

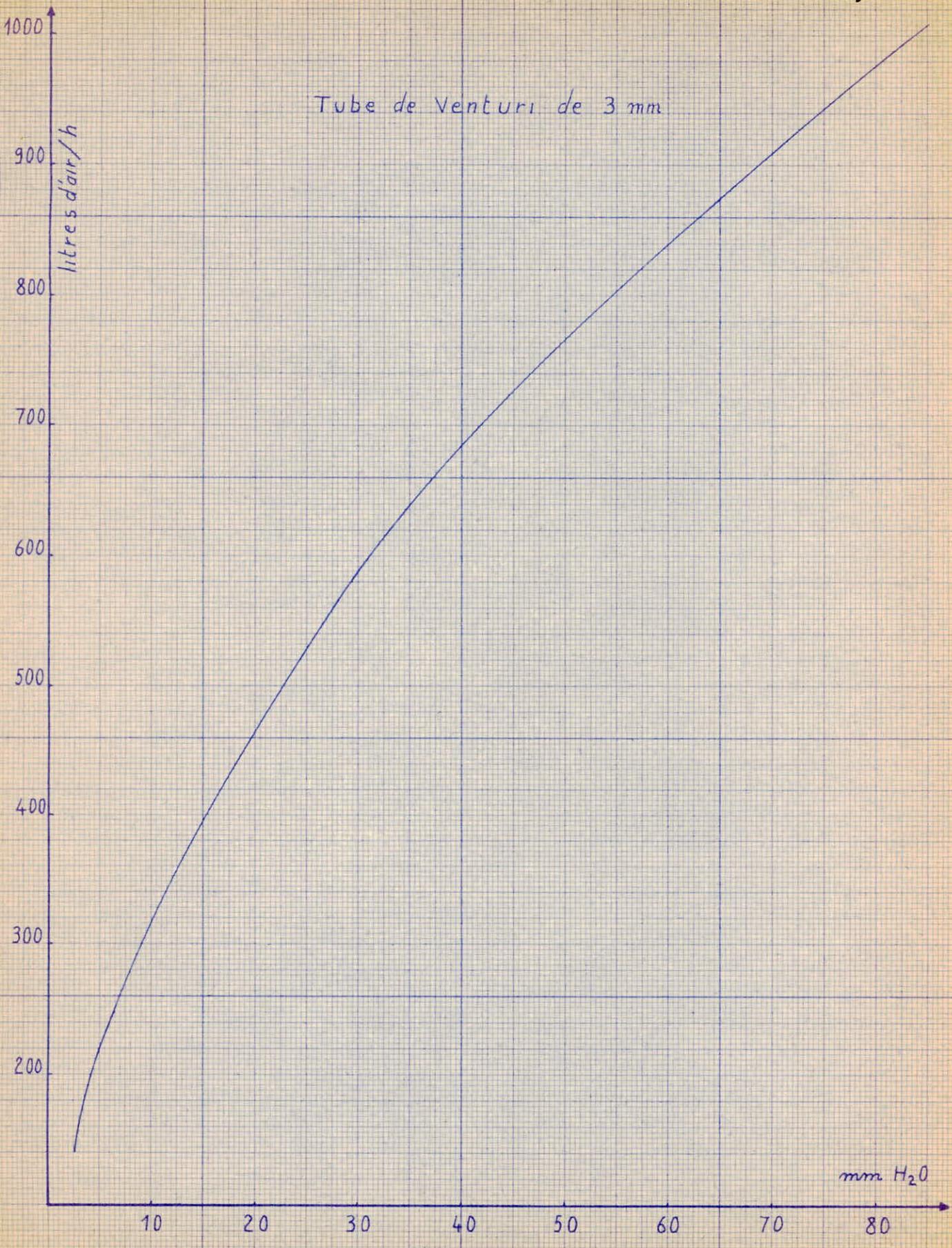
$\frac{\pi d^2}{4} = s$ section correspondante
 sc : la section contractée

$m = \frac{d^2}{D^2}$; $\mu = \frac{sc}{s}$ coefficient de contraction.

ρ : masse spécifique du fluide.

fig 4

Tube de Venturi de 3 mm



Le débit sera de la forme :

$$\text{pour l'air } Q = \frac{\mu \cdot p}{\sqrt{1 - M^2 \cdot m^2}} \cdot \sqrt{2 \frac{p_1 - p_2}{\rho}} = \frac{A}{\sqrt{\rho}}$$

pour le G.N.L. on a $Q' = \frac{A}{\sqrt{\rho'}}$

$$Q' = \sqrt{\frac{\rho}{\rho'}} \cdot Q$$

Le facteur de ~~contraction~~ *correction* sera alors :

$$\alpha = \sqrt{\frac{\rho}{\rho'}}$$

ETUDE THEORIQUE

2.1. Introduction et définitions de la convection

Dans un milieu fluide, le déplacement d'éléments matériels entre régions différentes s'accompagne de transfert de chaleur. Le fluide étant en contact avec la paroi du cylindre, le transfert se fait par convection.

La convection permet entre le G.N.L. et l'acier un transfert de chaleur de beaucoup supérieur à ce que donnerait la conduction. Sur la surface même, on considère que la transmission se fait par conduction à travers une couche laminaire mince, donc peu résistante thermiquement.

Il existe différents modes de convection :

- convection naturelle
- convection forcée
- convection vive (réaction chimique) ; mais elle ne se présente pas dans notre étude.

2.1.1. Convection naturelle

Les mouvements internes du fluide sont déterminés par les variations de volume massique dues à l'échauffement ou au refroidissement des éléments de la masse fluide. Le phénomène de convection naturelle est caractérisé par la relation de la forme $Nu = f(Gr, Pr)$ avec Pr : nombre de Prandlt ; il caractérise la nature du fluide. Il est donné par la relation $Pr = \frac{\mu \cdot Cp}{\lambda}$. C'est le rapport de la viscosité cinématique à la diffusivité thermique.

Gr : nombre de GRASHOF ; il caractérise la convection naturelle. On a $Gr = \frac{\beta \cdot g \cdot \Delta \theta \cdot L^3 \cdot \rho^2}{\mu^2}$

Pour les gaz et les liquides, d'après SAUNDERS avec $10^5 < Gr \cdot Pr < 10^8$ et pour un cylindres horizontal ou vertical (dimension caractéristique le diamètre D), le nombre de NUSSELT.

$$Nu = 0,47 (Gr \cdot Pr)^{0,25}$$

$$\text{Pour } Gr \cdot Pr > 10^8 \quad Nu = 0,17 (Gr \cdot Pr)^{0,33}$$

Le nombre de NUSSELT est un coefficient d'échange calorifique qui fournit une mesure du rapport de la quantité de chaleur transmise Q à la quantité de chaleur qui serait transmise à l'intérieur du fluide avec un gradient de température.

Tous ces nombres sont sans dimension

Le nombre Nu contient aussi le terme h (coefficient de convection) qui est une caractéristique du fluide

$$Nu = \frac{h \cdot l}{\lambda}$$

$$\text{d'où } h = \frac{\lambda \cdot Nu}{L}$$

2.1.2. Convection forcée

Les mouvements sont dus à l'écoulement de l'ensemble du fluide par rapport à la surface de contact. Il est important de reconnaître le type d'écoulement, c'est à dire laminaire ou turbulent.

Le régime turbulent apparaît d'autant plus facilement que :

- la vitesse V est grande
- le viscosité cinématique est faible
- la dimension caractéristique de l'écoulement D est grande.

En convection forcée, le régime turbulent est déterminé par la valeur du Reynolds (Re) :
avec $Re > 2000$.

On a la turbulence.

Le phénomène de convection forcée est caractérisé par la relation de la forme $Nu = f(Re, Pr)$

$$\text{avec } Re = \frac{\rho \cdot V \cdot D}{\mu}$$

ρ : masse volumique

V : vitesse d'écoulement

D : diamètre de la conduite

μ : viscosité dynamique

$$Pr = \frac{C_p \cdot \mu}{\lambda}$$

C_p : chaleur spécifique

λ : coefficient de conductibilité du fluide

$$\text{Enfin, } Nu = 0,020 \cdot Re^{0,8} \cdot Pr^{0,4}$$

qui est une relation valable pour l'eau.

D'autre part, nous avons une autre relation qui lie le Nu et le H (coefficient de convection)

$$Nu = \frac{h \cdot D}{\lambda} \quad \text{et par suite } h = \frac{\lambda \cdot Nu}{D}$$

2.2. Etude thermique de l'isolation d'une ligne cryogénique

Les calculs seront traités avec les formules du cylindre creux, car les rayons de courbures sont assez faibles.

Dimensions des éléments de la ligne

l = longueur du cylindre	= 1 m
R_1 = rayon intérieur du petit tube	= 6 mm
$R_2 = R_1 + e$ Rayon extérieur du petit tube	= 8 mm
e = épaisseur de la paroi	= 1 mm
R_3 = rayon interne du grande tube	= 50 mm
R_4 = rayon externe du grande tube	= 53 mm
$R_3 = R_2 + e$	
e' = épaisseur de la perlite	= 21 mm

Le fluide chaud est de l'air pris à 20°C (293°K)

Le fluide froid est le gaz naturel liquéfié à - 162° C (111°L) et qui circule dans le petit tube.

2.2.1. Caractéristiques physiques du GNL

$$\text{GNL} = 0,179 \text{ Kcal/m.h}(\text{°})$$

$$C_p = 0,796 \text{ Kcal/kg}(\text{°})$$

$$\mu = 0,428 \text{ Kg/m.h à } (-162\text{°C})$$

$$\rho = 0,46 \text{ kg/dm}^3$$

$$Pr = 1,904 \text{ (nombre de PRANDLT).}$$

Pour les valeurs de Re , Nu , h voir tableau et courbes (fig 5). Ces valeurs ont été calculées pour différents diamètres du tube, afin de choisir les dimensions adéquates, ainsi que pour différentes vitesses d'écoulement du fluide.

2.2.2. Caractéristiques de la perlite

masse volumique	$\rho = 96 \text{ kg/m}^3$
sous vide	$\lambda = 9,0 \cdot 10^4 \text{ Kcal/m.h } (^\circ) \text{ de } 70^\circ$ $\div 100^\circ\text{K}$
sous air	$\lambda = 22,4 \cdot 10^3 \text{ Kcal/m.h } (^\circ)$

2.2.3. Caractéristiques de l'acier inoxydable

$$\lambda = 22,4 \cdot 10^4 \text{ Kcal/m.s } (^\circ)$$

N.B. : Pour simplifier les calculs, nous supposons le régime permanent. Ce qui est le cas une fois le régime établi, autrement dit lorsque le système est mis en froid.

2.2.4. Calcul du flux de chaleur2.2.4.1. Convection du fluide froid (GNL) à la paroi interne du tube.

$$\phi = h \cdot 2 \pi \cdot R_1 \cdot l \cdot (T_{p1} - T_{GNL})$$

T_{p1} étant la température interne de la paroi.

Si on prend comme surface de référence la surface externe du petit tube on a :

$$2\pi R_2 \phi = 1 \text{ et par suite } 2\pi l = \frac{1}{R_2}$$

$$\text{Le flux devient } \phi = h \frac{R_1}{R_2} (T_{p1} - T_{GNL})$$

2.2.4.2. Conduction à travers la paroi du tube

$$\begin{aligned} \phi &= \frac{2 \pi \lambda_{\text{acier}} \cdot l \cdot (T_{p2} - T_{p1})}{\ln (R_2/r_1)} \\ &= \frac{\lambda_{\text{acier}} (T_{p2} - T_{p1})}{R_2 \ln (R_2/R_1)} \end{aligned}$$

2.2.4.3. Conduction à travers le calorifuge

$$\phi = \frac{\lambda_{perlite} (T_{p3} - T_{p2})}{R_2 \ln (R_3/R_2)}$$

2.2.4.4. Conduction à travers la paroi du grand tube

$$\begin{aligned} \phi &= \frac{2\pi \lambda_{acier} l (T_{p4} - T_{p3})}{\ln (R_4/r_3)} \\ &= \frac{\lambda_{acier} (T_{p4} - T_{p3})}{R_2 \ln (R_4/R_3)} \end{aligned}$$

2.2.4.5. Convection de la paroi externe du tube.

$$\begin{aligned} \phi &= h_{air} \cdot 2\pi R_4 l (T_{air} - T_{p4}) \\ &= \frac{h_{air} R_4 (T_{air} - T_{p4})}{R_2} \end{aligned}$$

Le flux qui passe d'une couche à l'autre étant le même, nous pouvons écrire.

$$\begin{aligned} \phi &= \frac{hR_1 (T_{p1} - T_{GNL})}{R_2} = \frac{\lambda_{acier} (T_{p2} - T_{p1})}{R_2 \ln (R_2/R_1)} = \frac{\lambda_{perlite} (T_{p3} - T_{p2})}{R_2 \ln (R_3/R_2)} \\ &= \frac{\lambda_{acier} (T_{p4} - T_{p3})}{R_2 \ln (R_4/R_3)} = \frac{h_{air} R_4 (T_{air} - T_{p4})}{R_2} \end{aligned}$$

Cette expression peut aussi s'écrire !

$$\phi = \frac{T_{p1} - T_{GNL} + T_{p2} - T_{p1} + T_{p3} - T_{p2} + T_{p4} - T_{p3} + T_{air} - T_{p4}}{\frac{R_2}{hR_1} + \frac{R_2}{\lambda_{acier} \ln (R_2/R_1)} + \frac{R_2}{\lambda_{perlite} \ln (R_3/R_2)} + \frac{R_2}{\lambda_{acier} \ln (R_4/R_3)} + \frac{R_2}{h_{air} R_4}}$$

./.

Le flux prend la forme finale :

$$\phi = \frac{2\pi l (T_{air} - T_{gnl})}{\frac{1}{hR_1} + \frac{\ln(R_2/R_1)}{\lambda_{acier}} + \frac{\ln(R_3/R_2)}{\lambda_{perlite}} + \frac{\ln(R_4/R_3)}{\lambda_{acier}} + \frac{1}{h_{air} R_4}}$$

Application numérique :

Hypothèse : le diamètre du tube étant petit (6mm), on considère que dans une section, la variation de température du GNL ne varie pas. La température moyenne du fluide sera alors égale à la température d'ébullition soit (-162°C). Cette hypothèse est faite pour le calcul du PRANDLT.

Pour une vitesse $V = 2m/s$, nous avons le coefficient de convection $h = 4178,01 \text{ Kcal/m}^2 \cdot h(^{\circ})$ d'après les calculs faits précédemment.

Pour la température de l'air, on choisit celle de l'air ambiant, soit $T_{air} = 20^{\circ}C$.

La température de liquéfaction du GNL est $T_{gnl} = -162^{\circ}C$

$$\begin{array}{ll} R_1 = 3\text{mm} & R_3 = 25 \text{ mm} \\ R_2 = 4\text{mm} & R_4 = 26,5 \text{ mm} \end{array}$$

Le coefficient de convection de l'air est calculé d'après les caractéristiques de l'air prises sur l'abaque (Mr ADAMS) à 20°C : $h_{air} = 0,0296 \text{ Kcal/m}^2 \cdot s (^{\circ})$.

Le flux total est alors égal à : $\phi = 0,1644 \text{ cal/s}$.

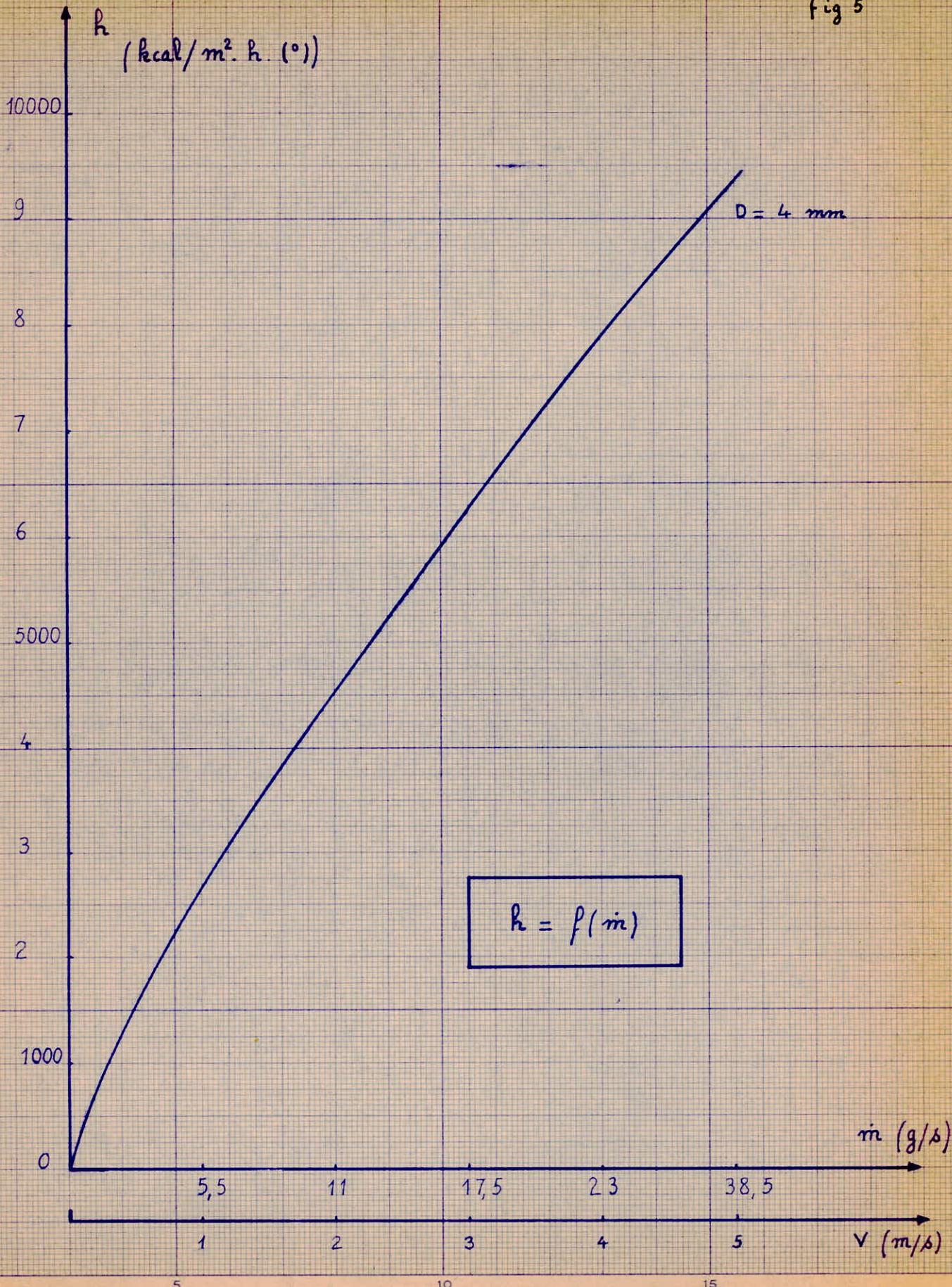
Le calcul du flux a été fait pour diverses vitesses (débits). Les résultats sont donnés sur le tableau (II-11). Nous en déduisons la courbe $\phi = f(\dot{m})$ avec \dot{m} étant le débit massique de GNL évaporé. Ce débit est déterminé par la relation $\dot{m} = \frac{\phi}{Lev}$.

Lev = chaleur latente de vaporisation ou enthalpie de vaporisation du GNL.

CARACTERISTIQUES DU GNL POUR L'ECOULEMENT
DANS LE TUBE 4/6

Vitesses m/s	REYNOLDS	NUSSELT	h/Kcal/m ² h. (°)
1,00	10476,63	58,15	2602,34
1,20	18571,96	67,28	3010,99
1,40	21667,28	76,11	3406,17
1,60	24762,60	84,69	3790,18
1,80	27857,93	93,06	4164,68
2,00	30953,25	101,25	4530,94
2,20	34048,57	109,27	4889,93
2,40	37143,90	117,14	5242,44
2,60	40239,22	124,89	5589,11
2,80	44334,55	132,52	5930,49
3,00	46429,87	140,04	6267,02
3,20	46429,87	140,04	6267,02
3,60	55715,85	162,03	7251,14
3,80	58811,17	169,19	7571,66
4,00	61906,50	176,28	7888,82
4,20	65001,81	183,30	8202,83
4,40	68097,14	190,25	8513,85
4,60	71192,46	197,14	8822,07
4,80	74287,79	203,96	9127,61
5,00	77383,12	210,74	9430,62
5,20	80478,43	217,45	9731,21

Fig 5



CARACTERISTIQUES DU GNL POUR L'ECOULEMENT

DANS LE TUBE 6/8

Vitesse m/s	REYNOLDS	NUSSELT	h/Kcal/m ² h(°)
1,00	23214,94	80,43	2399,64
1,20	27857,93	93,06	2776,46
1,40	32500,92	105,28	3140,86
1,60	37143,91	117,14	3494,96
1,80	41786,89	128,72	3840,29
2,00	46429,88	140,04	4178,01
2,20	51072,86	151,14	4509,04
2,40	55715,85	162,03	4834,09
2,60	60358,83	172,75	5153,76
2,80	65001,82	183,30	5468,55
3,00	69644,81	193,70	5778,37
3,20	74287,79	203,96	6085,07
3,40	78930,78	214,10	6387,47
3,60	83573,76	224,12	6686,33
3,80	88216,75	234,02	6981,89
4,00	92859,73	243,83	7274,34
4,20	97502,71	253,53	7562,89
4,40	102145,70	263,15	7850,69
4,60	106788,68	272,67	8134,90
4,80	111431,67	282,12	8416,64
5,00	116074,65	291,48	8696,05
5,20	120717,63	300,77	8973,23

fig 5

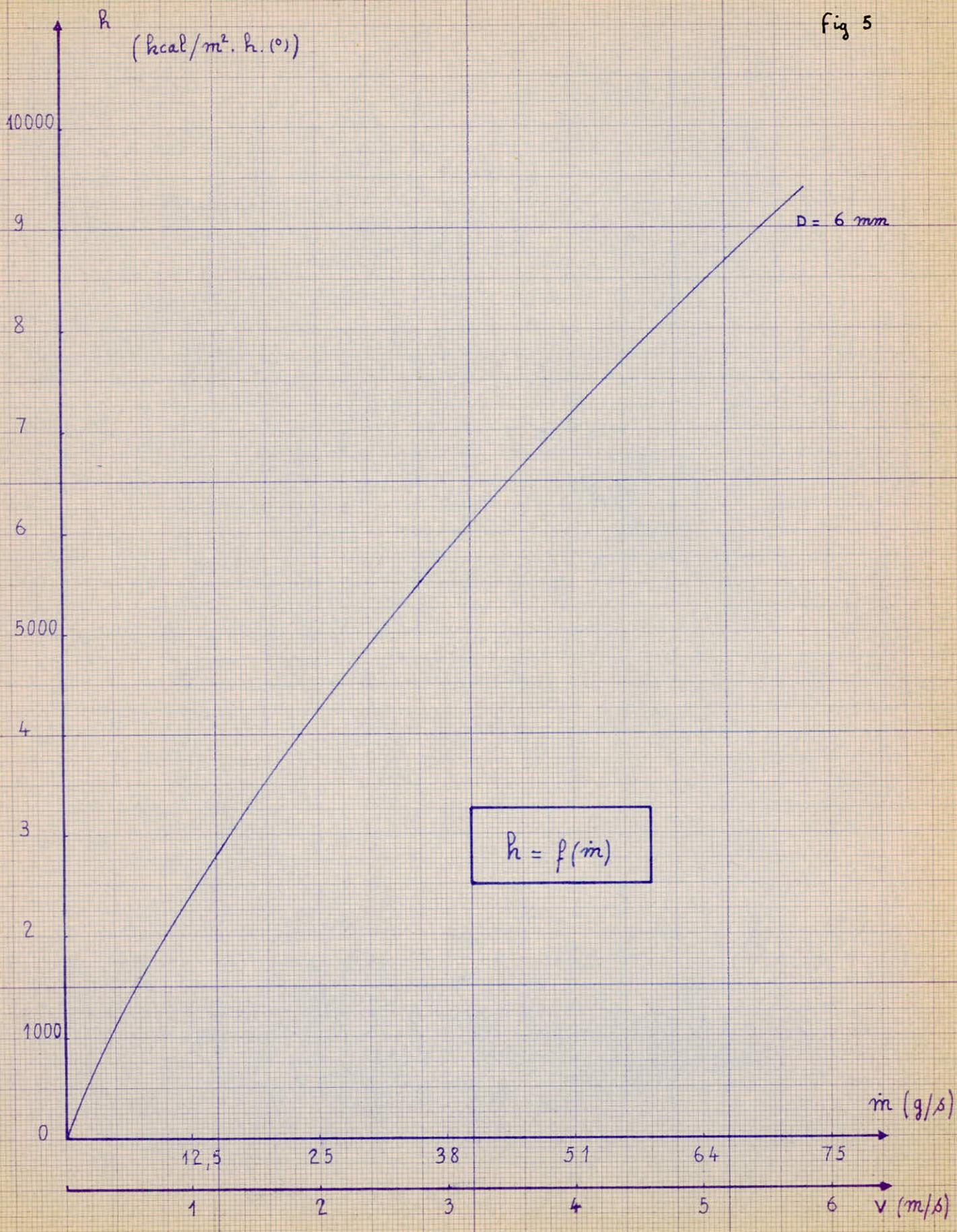
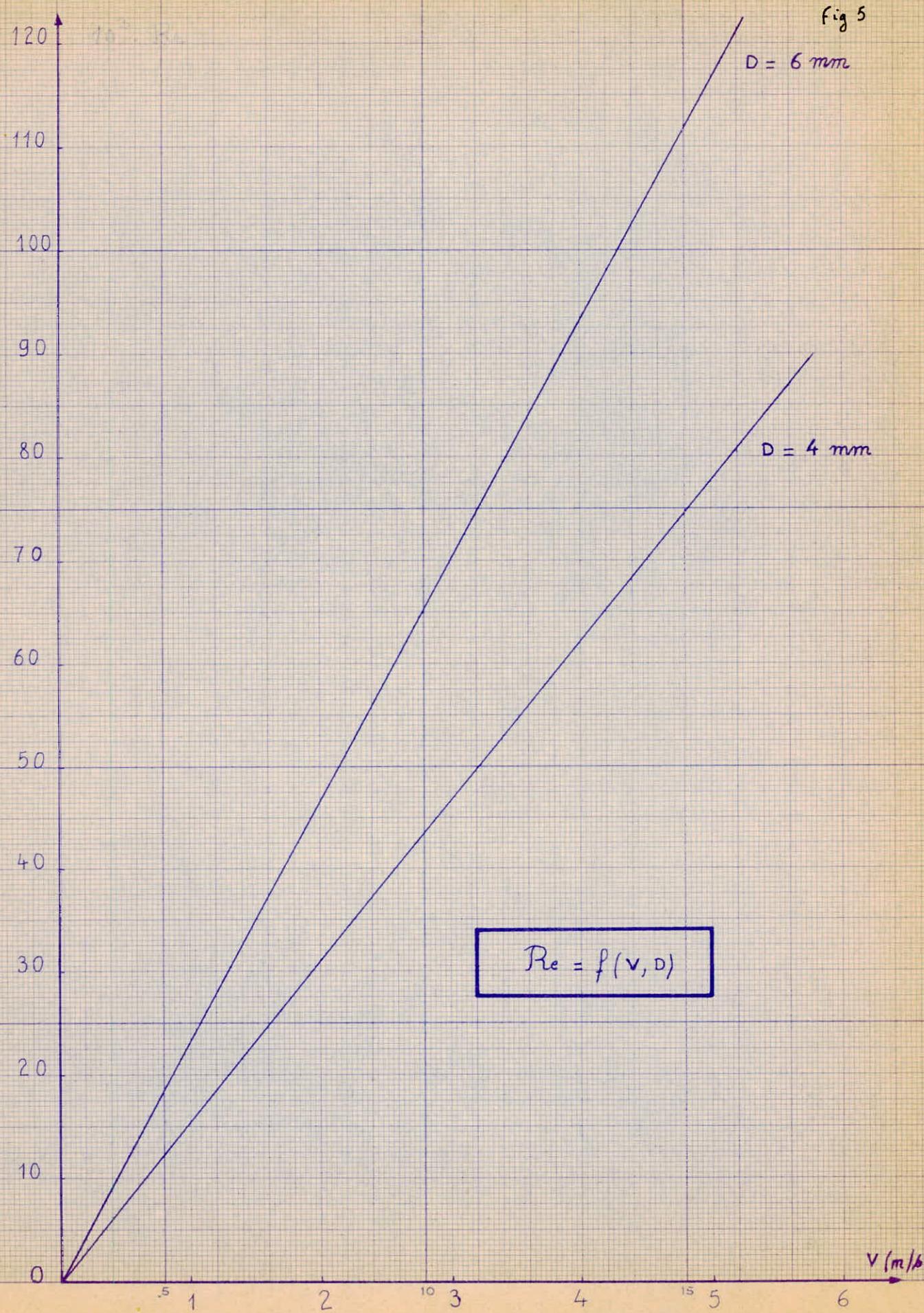


Fig 5



CARACTERISTIQUES DE L'AZOTE.
pour l'écoulement dans le
tube 4/6

vitesse m/s	reynolds	nusselt	h K CAL/m ² .h.°C
0,20	4561,42	15,04	676,97
0,40	9142,85	26,19	1178,69
0,60	13714,28	36,22	1630,69
0,80	18285,71	45,60	2052,21
1,00	22857,14	54,51	2453,30
1,20	27428,56	63,07	2838,55
1,40	31999,98	71,35	3211,10
1,60	36571,41	79,40	3573,11
1,80	41142,83	87,24	3926,17
2,00	45714,26	94,92	4271,45
2,20	50285,67	102,44	4609,87
2,40	54857,10	109,82	4942,20
2,60	59428,53	117,08	5269,02
2,80	63999,98	124,24	5590,84
3,00	68571,37	131,29	5908,10
3,20	73142,81	138,24	6221,15
3,40	77714,23	145,11	6530,32
3,60	82285,65	151,90	6835,86
3,80	86857,07	158,62	7138,02
4,00	91428,50	165,26	7437,02
4,20	95999,92	171,84	7733,04
4,40	100571,34	178,36	8026,26
4,60	105142,76	184,91	8316,82
4,80	190714,18	191,21	8604,8 6
5,00	114285,19	197,56	8890,52

CARACTERISTIQUES DE L'AZOTE
pour l'écoulement dans le
tube 6/8

vitesse m/s	Reynolds	Nusselt	h Kcal/m ² .h.°c
0,20	6857,14	20,80	624,24
0,40	13714,28	36,22	1086,87
0,60	20571,42	50,11	1503,33
0,80	27428,56	63,07	1892,36
1,00	34285,71	75,40	2262,21
1,20	41142,84	87,24	2617,44
1,40	47999,97	98,69	2960,98
1,60	54857,11	109,82	3294,80
1,80	61714,25	120,67	3620,35
2,00	68571,39	131,29	3938,73
2,20	75428,51	141,69	4250,80
2,40	82285,65	151,90	4557,24
2,60	89142,79	161,95	4858,60
2,80	95999,92	171,84	5155,36
3,00	102857,06	181,59	5447,91
3,20	109714,20	191,21	5736,58
3,40	116571,32	200,72	6021,65
3,60	123428,46	210,11	6303,40
3,80	130285,60	219,40	6582,03
4,00	137142,75	228,59	6857,74
4,20	143999,87	237,69	7130,70
4,40	150857,00	246,70	7401,08
4,60	157714,12	255,63	7669,00
4,80	164571,28	264,48	7934,61
5,00	171428,40	273,26	8198,32

Fig 5

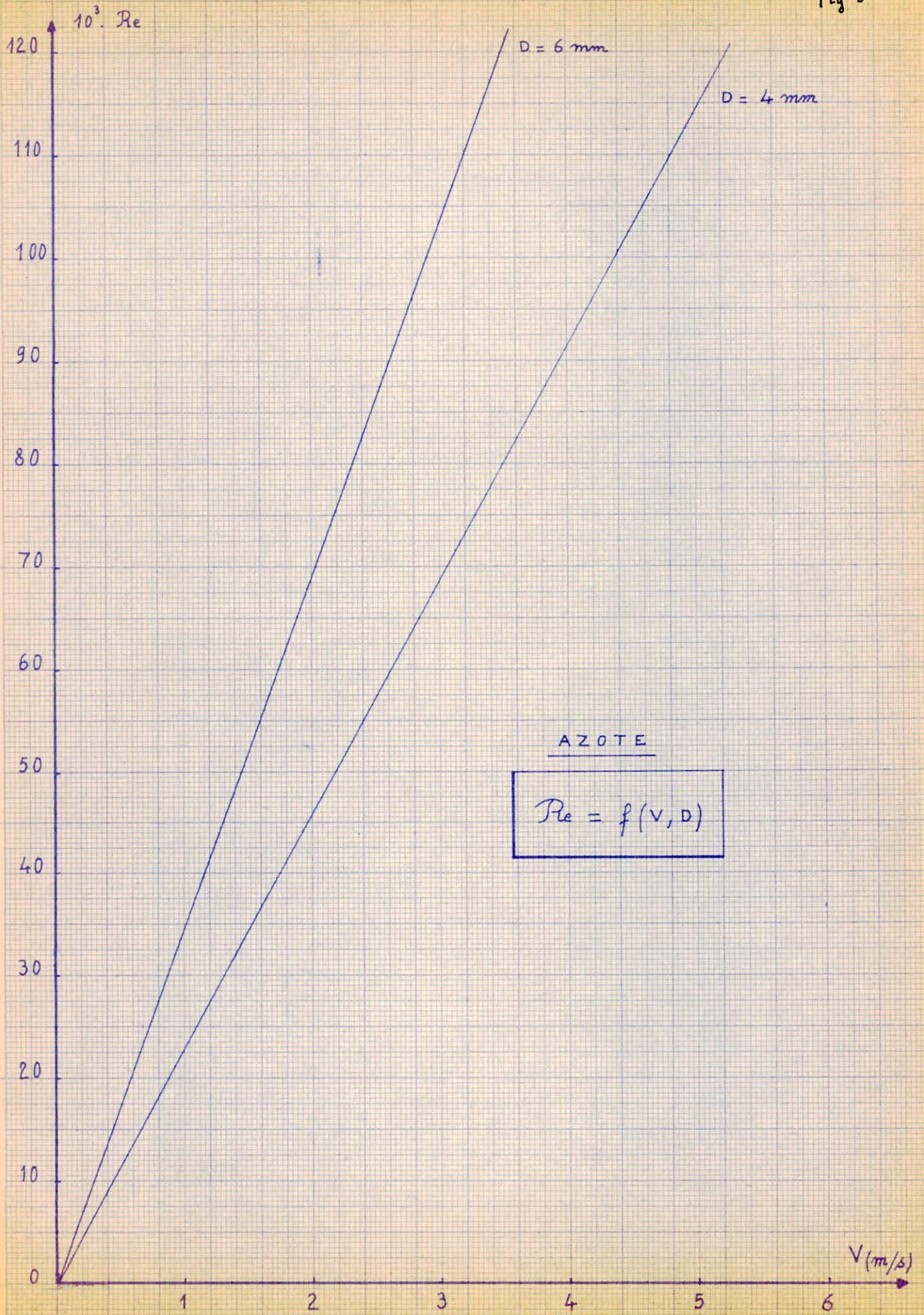
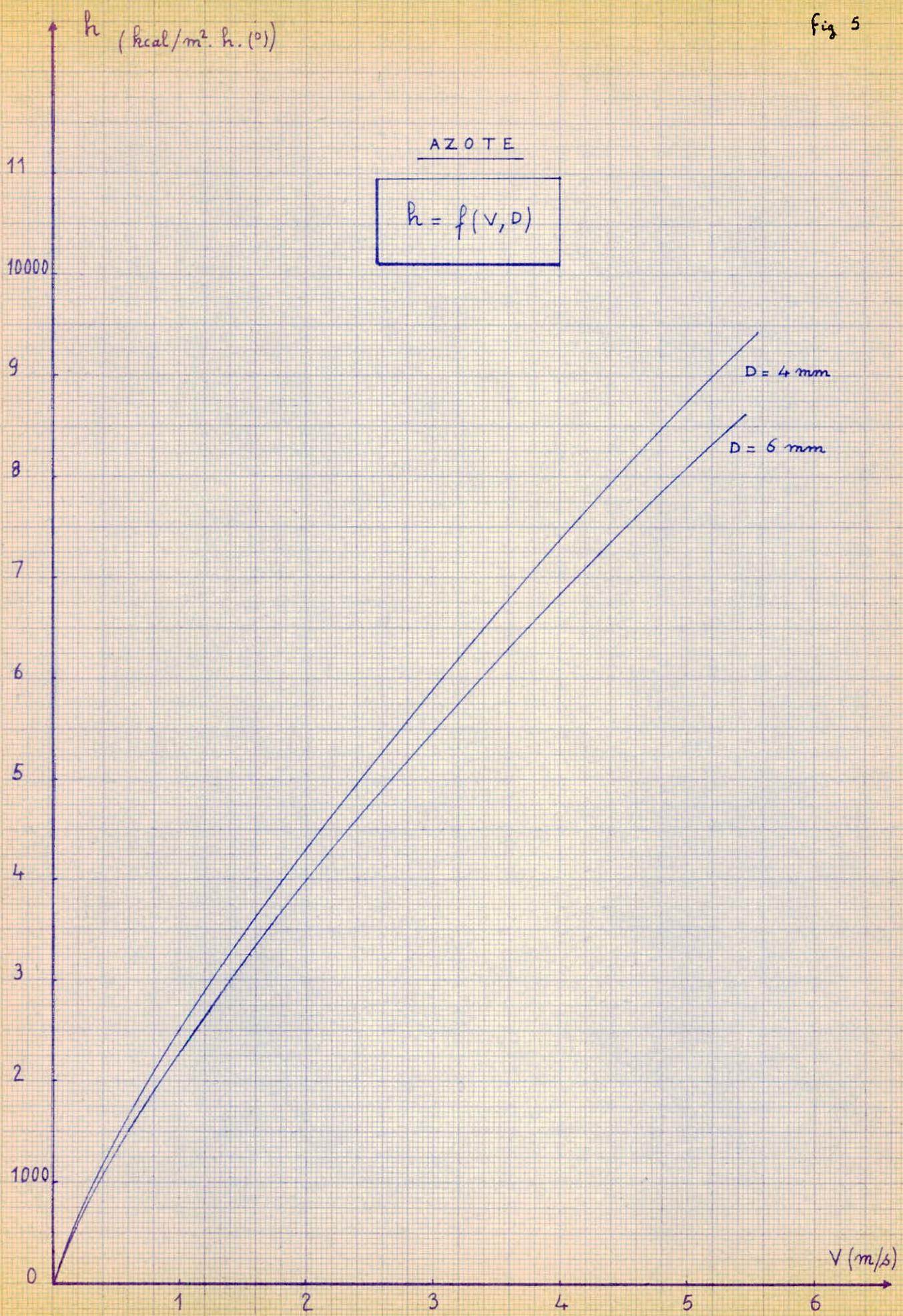


Fig 5



VALEURS DU FLUX ET DU DEBIT DE GNL
EVAPORE (TUDE 4/6)

Vitesses m/s	Débit de GNL cm ³ /s	Flux de chaleur cal/s	GNL évaporé l/h
1,00	12	0,14221	5,775
1,20	15	"	"
1,40	17	"	"
1,60	20	"	"
1,80	22	"	"
2,00	25	0,14222	5,776
2,20	27	"	"
2,40	30	"	"
2,60	32	"	"
2,80	35	"	"
3,00	35	"	"
3,20	40	"	"
3,40	42	"	"
3,60	45	"	"
3,80	47	"	"
4,00	50	"	"
4,20	52	"	"
4,40	55	"	"
4,60	57	"	"
4,80	60	"	"
5,00	62	"	"
5,20	65	"	"

VALEURS DU FLUX ET DU DEBIT DE GNL
EVAPURE (TUBE 6/8)

Vitesse m/s	Débit de GNL cm ³ /s	Flux de chaleur cal/s	GNL évaporé l/h
1,00	28	0,16452	6,690
1,20	33	0,16454	6,692
1,40	39	"	"
1,60	45	"	"
1,80	50	"	"
2,00	56	"	"
2,20	62	"	"
2,40	67	"	"
2,60	73	"	"
2,80	79	"	"
3,00	84	"	"
3,20	90	"	"
3,40	90	"	"
3,60	101	"	"
3,80	107	"	"
4,00	113	"	"
4,20	118	"	"
4,40	124	"	"
4,60	129	"	"
4,80	135	"	"
5,00	141	"	"
5,20	146	"	"

Nous remarquons d'après les valeurs du tableau que h_{GNL} est grand devant les grandeurs caractéristiques de l'acier et de la perlite. Comme le coefficient de convection h_{GNL} intervient dans le calcul du flux sous la forme $\frac{1}{h}$ au dénominateur, le terme $\frac{1}{h}$ reste faible devant les termes comprenant les caractéristiques de l'acier et du calorifuge. Nous pouvons conclure que h n'influe pas sur la valeur du flux et par conséquent la vitesse aussi.

De plus, le flux a une valeur très faible ; par suite la masse de GNL évaporée est très faible et est presque constante en fonction de la vitesse.

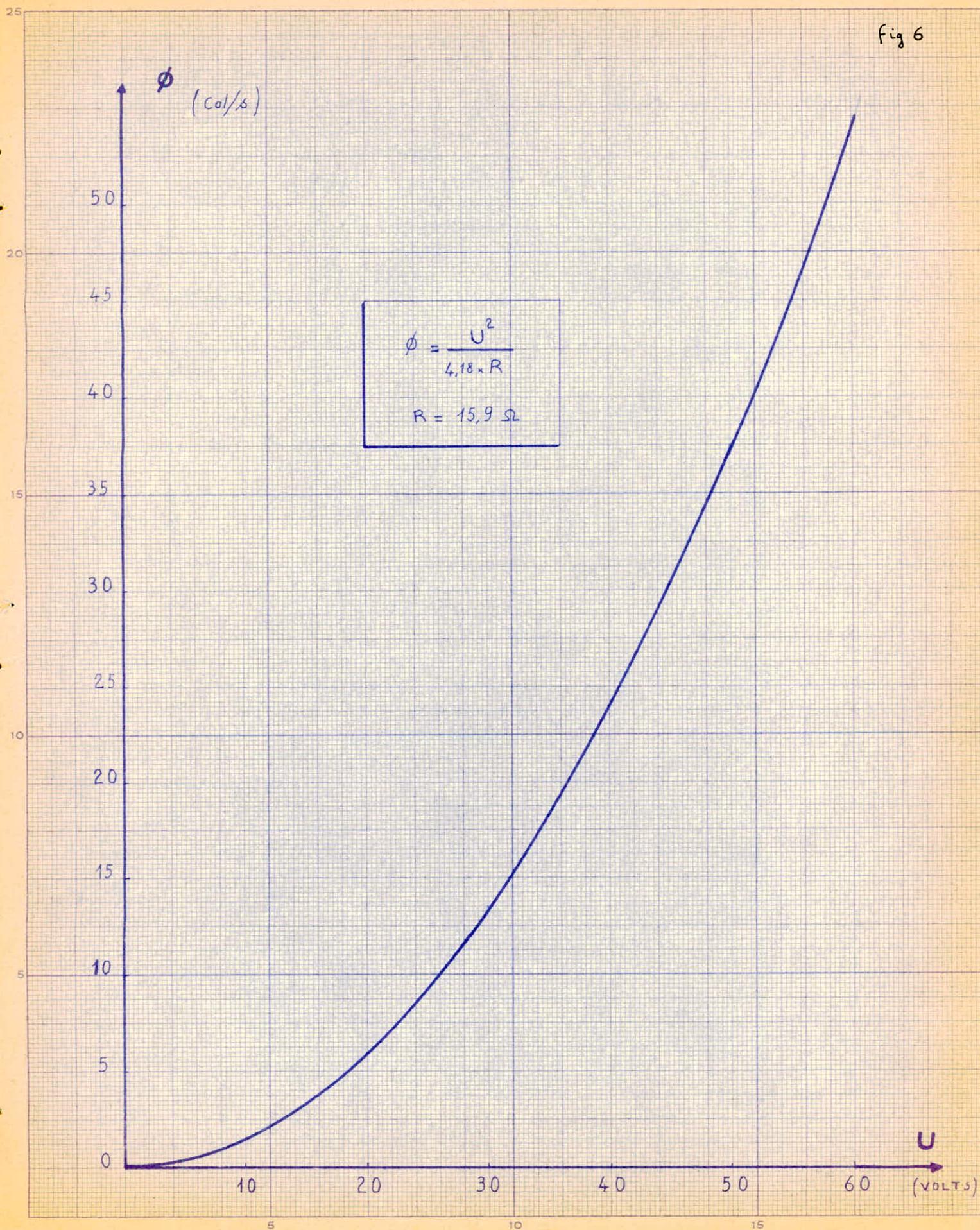
2.3. Calcul de la résistance chauffante

2.3.1. But

Cette résistance chauffante est montée aux bornes d'un variateur de tensions. Connaissant la tension et la résistance, nous pouvons déterminer le flux et par suite la quantité de GNL évaporée.

De là, nous tracerons la courbe du débit volumique de gaz en fonction du flux fourni par la résistance. Ensuite, connaissant l'évaporation naturelle, nous déterminerons graphiquement le flux qui passe à travers le calorifuge.

Fig 6



2.3.2. Caractéristiques de la résistance

C'est un thermo-coax INCAC de $5,3 \Omega/m$

I : signifie que c'est un thermo-coax monofilaire

N et C représentent les composants principaux du conducteur (Nickel-Chrome).

AC désigne le composant de la gaine (acier inoxydable).

2.3.3. Caractéristiques de la résistance

Les calculs seront faits pour un débit d'évaporation de 90 l/h , ce qui donne un flux de :

$$\dot{Q} = \dot{m} \cdot L_v$$

$$\dot{m} = \frac{90 \text{ l/s}}{3600} = \frac{90}{3600} \times \frac{16}{22,4} \text{ g/s}$$

L'enthalpie de vaporisation du GNL est 124 cal/g .

$$\text{d'où } \dot{Q} = \frac{90 \cdot 16}{3600 \cdot 22,4} \cdot 124 = 2,20 \text{ cal/s.}$$

Nous prenons une tension moyenne de 12 V fournie par la variation de tension et mesurée par un Voltmètre.

Le flux est aussi donné par la relation

$$\dot{Q} = RI^2 = \frac{U^2}{R} \text{ (J/s)}$$

$$\dot{Q} 4,18 = \frac{12^2}{R}$$

$$R = \frac{12^2}{2,2 \cdot 4,18} = 15,9 \Omega$$

La résistance totale étant de $15,9 \Omega$ et la résistance du thermo-coax de $5,3 \Omega/m$, la longueur du fil sera :

$$L = \frac{R}{5,3} = \frac{15,9}{5,3} = 3 \text{ m.}$$

$$L = 3 \text{ m } 1 \text{ NCAC à } 5,3 \Omega/m.$$

2.4. Calcul de la chambre de combustion

La chambre de combustion se présente sous la forme d'un parallélépipède de section 120 x 80. Dans cette chambre circule de l'air chaud. Un injecteur percé fournit le GNL nécessaire à la combustion.

Il s'agira de calculer :

- la masse de GNL nécessaire à la combustion avec comme paramètres la richesse (ϕ) et le débit massique d'air (\dot{m}).
- le débit de GNL fourni par l'injecteur avec comme paramètres la pression amont et le nombre de trous.
- le flux de chaleur GNL-air en fonction de la température de l'air.

2.4.1. Calcul de la masse de GNL nécessaire à la combustion

$$\dot{m}_{\text{GNL}} = \phi \cdot f_s \cdot \dot{m}_{\text{air}}$$

avec ϕ = richesse

$f_s = 0,008$: rapport de mélange stochiométrique.

\dot{m}_{air} = débit massique d'air.

Les calculs seront faits pour des masses d'air de 1 ; 1,5 et 2 kg/s et pour des richesses allant de 0,1 à 1,3.

Application numérique :

pour $\phi = 0,7$ et $\dot{m}_{\text{air}} = 1,0$ kg/s, on a

$$\dot{m}_{\text{GNL}} = 60,8 \text{ g/s.}$$

Tableau des débits de GNL en fonction de la masse d'air et de la richesse.

m GNL en g/s

ϕ	0,1	0,3	0,5	0,7	0,9	1,1	1,3
m air							
1 kg/s	5,8	17,4	28,9	40,6	52,1	63,7	75,3
1,5	8,7	26	43,3	60,8	78,2	95,6	113
2	11,6	34,8	59,8	104,2	127,4	150,6	173,8

2.4.2. Calcul du débit de GNL fourni par l'injecteur

On se propose de calculer le débit de GNL en fonction des conditions initiales. Le tube d'alimentation de l'injecteur est pris comme état générateur. On assimile l'injecteur à un orifice dont la section est égale à la somme des sections des trous d'injection.

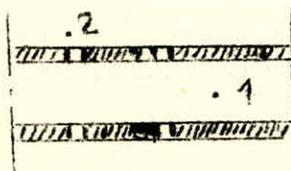
$$S = n \cdot s$$

n = nombre de trous

2.4.2.1. Calcul de la vitesse de sortie du GNL

On prend comme hypothèses que :

- le fluide est incompressible
- la vitesse d'entrée (état 1) $C_1 = 0$
- pertes de charge $\mu = 0,6$
- $P_2 = 1 \text{ bar}$



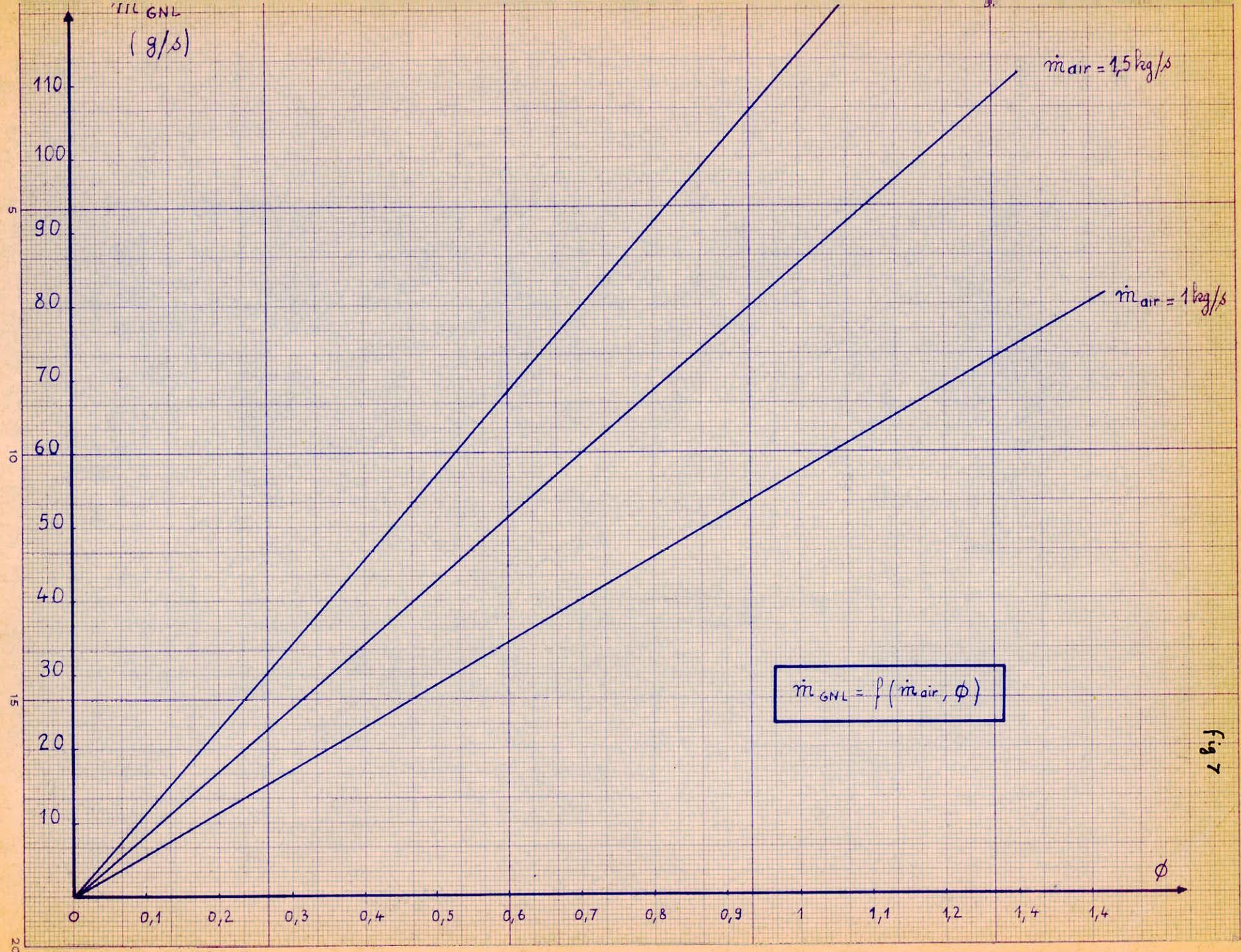


Fig 7

La relation de BERNOULLI entre (1) et (2) donne

$$\frac{P_1 - P_2}{\rho} + \frac{1}{2} (C_2^2 - C_1^2) = 0$$

$$\text{d'où } C_2 = \sqrt{\frac{P_1 - P_2 \cdot 2}{\rho}}$$

et en tenant compte des pertes de charge

$$C_2 = \mu \sqrt{2 \cdot \frac{P_1 - P_2}{\rho}}$$

2.4.2.2. Débit de GNL

$$\begin{aligned} \dot{m}_{\text{GNL}} &= \rho \cdot s \cdot C_2 \\ &= \mu n \cdot s \cdot \sqrt{2 \rho (P_1 - P_2)} \end{aligned}$$

Ce débit sera calculé pour P_1 variant de 1 à 10 bars et pour n variant de 12 à 36 trous.

Application numérique :

pour $P_1 = 7$ bars et $n = 24$, on a :

$$\dot{m}_{\text{GNL}} = 83,9 \text{ g/s}$$

./.

Tableau donnant \dot{m}_{GNL} (g/s) en fonction de P et n .

P Kg/cm ²	n vm/s	12	18	24	30	36
		0	0	0	0	0
1	0	0	0	0	0	0
2	6,09	17,1	25,7	34,2	42,8	51,4
3	9,32	24,2	36,3	48,4	60,6	72,7
4	11,42	29,6	44,5	59,3	74,2	89
5	13,18	34,2	51,4	68,5	85,7	102,8
6	14,74	38,3	57,3	76,6	95,8	115
7	16,15	41,9	62,9	83,9	104,9	125,9
8	17,44	45,3	68	90,7	113,3	136
9	18,65	48,4	72,7	96,9	121,2	145,4
10	1978	51,4	77,1	102,8	128,5	154,2

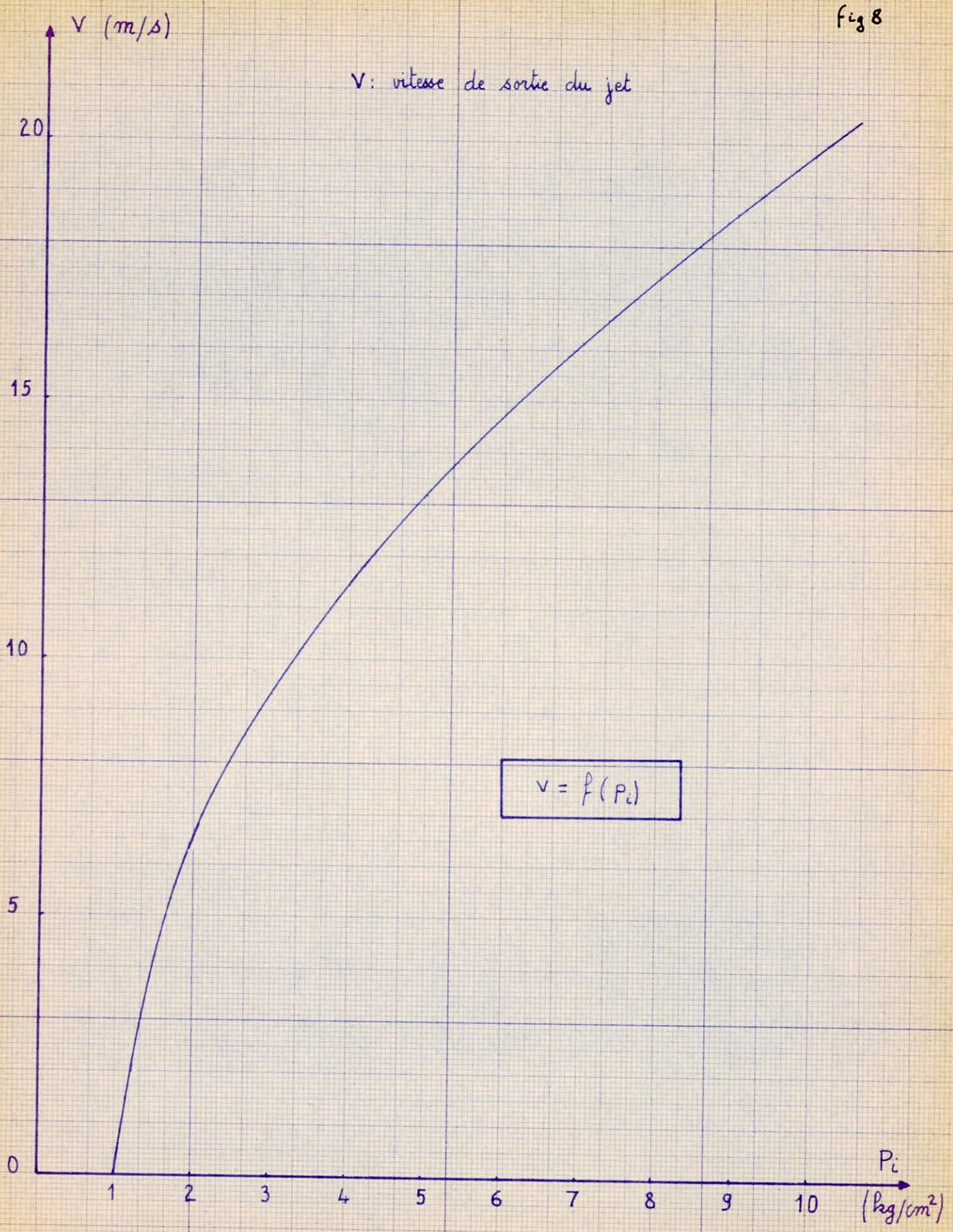
24.3. Calcul du flux de chaleur :

Il s'agit du flux de chaleur échangé entre l'air chaud à la température T2 et le GNL. Les calculs seront faits pour plusieurs valeurs de T2.

./.

Fig 8

v: vitesse de sortie du jet



\dot{m}_{GNL}
(g/s)

fig 9

n=36

n=30

n=24

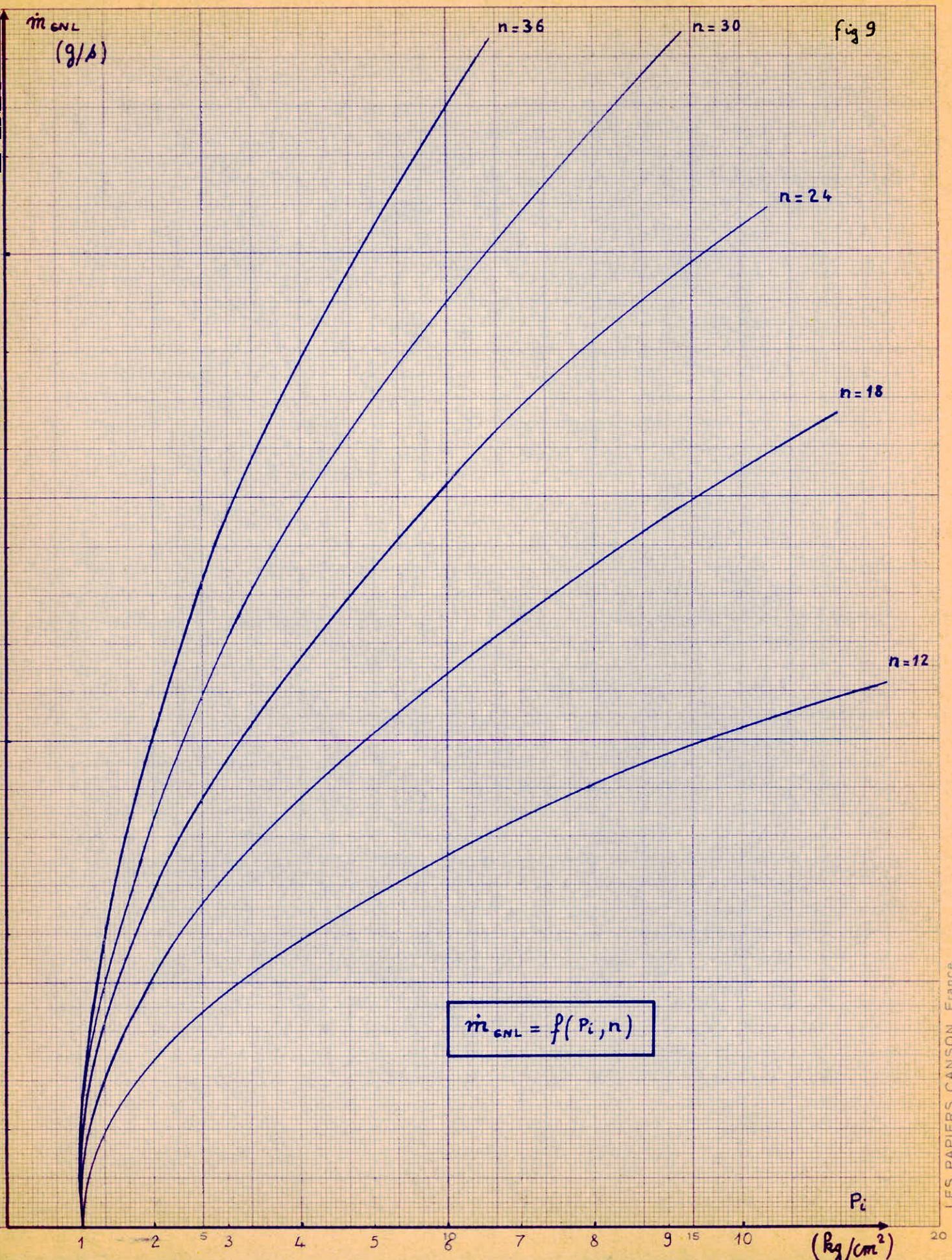
n=18

n=12

$$\dot{m}_{GNL} = f(P_i, n)$$

P_i

(kg/cm²)



2.4.3.1. Calcul des grandeurs sans dimensions pour l'air.

- nombre de Reynolds

$$Re = \rho \frac{V \cdot D}{\mu}$$

$$V = \text{vitesse} = \frac{\dot{m}_{\text{air}}}{\rho \cdot S}$$

$$D = \text{diamètre hydraulique} = 4 \cdot \frac{S}{P}$$

$$\dot{m}_{\text{air}} = \text{débit massique d'air} = 1,5 \text{ kg/s}$$

$$\rho = \text{masse volumique} = \rho_1 \cdot \frac{T_1}{T_2}$$

$$\text{avec } \rho_1 = 1,293 \text{ kg/m}^3$$

$$\text{et } T_1 = 273 \text{ }^\circ\text{K.}$$

- nombre de Prandlt

$$Pr = \frac{\mu C_p}{\lambda}$$

- nombre de Nusselt

$$Nu = 0,02 Re^{0,8} \cdot Pr^{0,4}$$

- le coefficient de convection entre l'air et la paroi externe de l'injecteur.

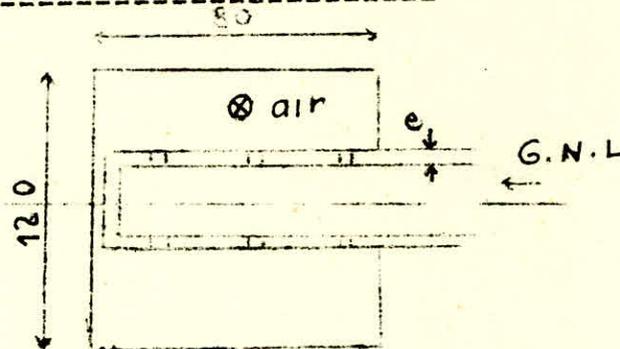
$$h = \frac{Nu \cdot \lambda}{D}$$

2.4.3.2. Calcul des grandeurs sans dimension pour le GNL.

Ce sont les mêmes formules que celles utilisées précédemment pour l'air sauf que, pour le Re, le diamètre n'est plus le diamètre hydraulique, mais le diamètre de l'injecteur $D_e = 10 \text{ mm}$.

On calcule de même le coefficient de convection h GNL entre le GNL et la paroi interne de l'injecteur
 $D_i = 8 \text{ mm.}$

2.4.3.3. Calcul du flux de chaleur



Nous avons les étapes du flux suivantes :

- convection air-paroi injecteur
- conduction à travers l'épaisseur de l'injecteur
- convection paroi-injecteur - GNL

Nous en déduisons :

$$\phi = \frac{2 \pi l (T_2 - T_{GNL})}{\frac{1}{h_{GNL} R_1} + \frac{\ln(R_2/R_1)}{\lambda_{acier}} + \frac{1}{h_{air} R_2}}$$

Pour un débit de $\dot{m}_{GNL} = 147 \text{ g/s}$ on a :

$$Re = 612299,6267$$

$$Pr = 1,9032$$

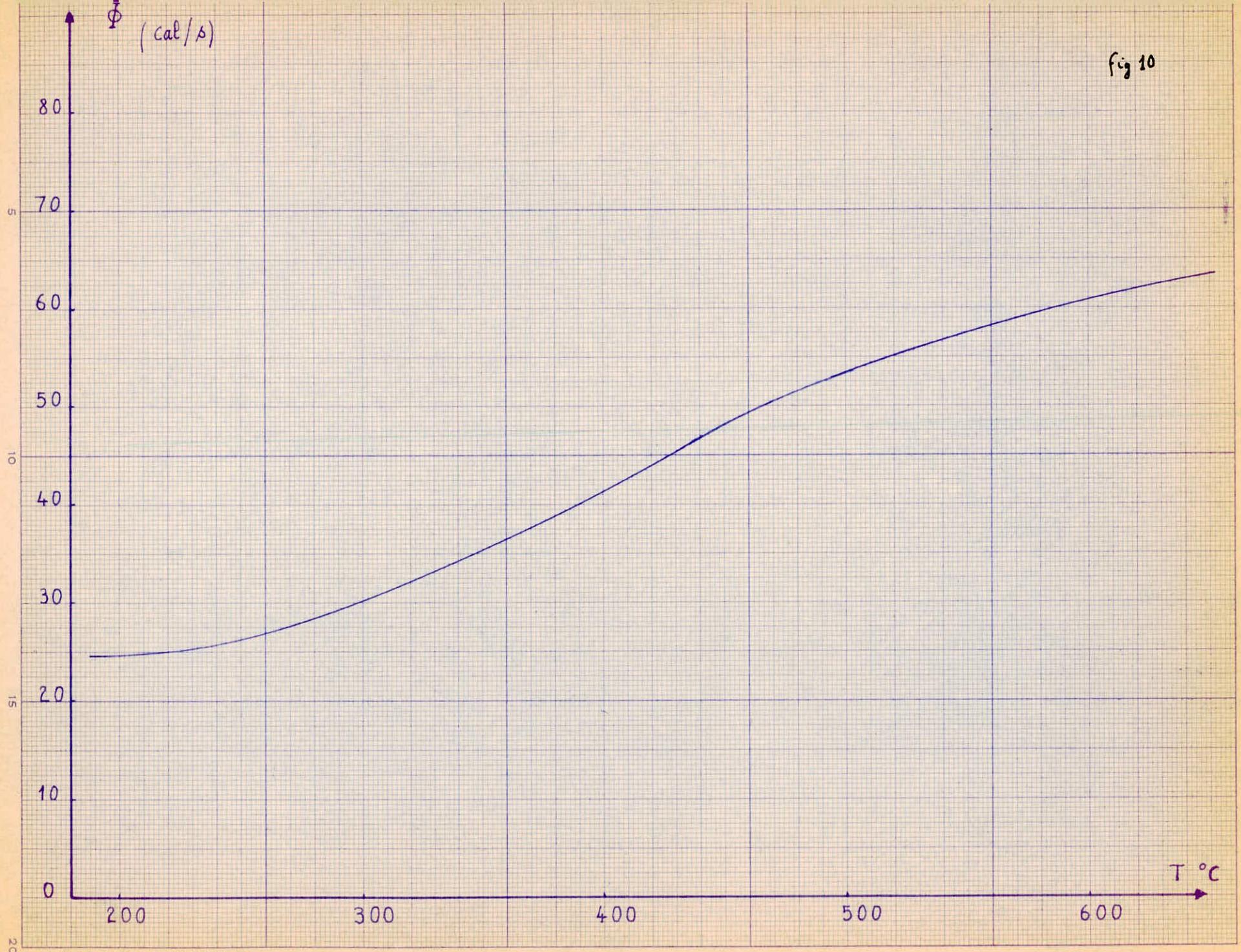
$$Nu = 1102,5581$$

$$h = 6,8527 \text{ Kcal/m}^2 \text{ s}^\circ$$

VALEUR DU FLUX EN FONCTION DE LA
TEMPERATURE DE L'AIR

T°K (Air)	V m/s	Re	Pr	Nu	h kcal/m ² s°	ø cal/s
204	211,14	58559,45	6,8100	281,80	0,0272	24,5
315	260,27	50968,4	7,179	256,63	0,0274	32,2
400	297,9	47047,76	6,6822	233,90	0,0296	41
649	408,12	38226,31	6,9139	200,82	0,0319	63,6

fig 10



2.5. Calculs du réservoir de 70 litres

Il s'agit de calculer les dimensions d'un réservoir de GNL de contenance 70 l, de telle façon que le taux d'évaporation soit nul (convection naturelle).

Ce taux d'évaporation dépend de 2 facteurs :

- l'épaisseur de perlite
- la surface d'échange GNL - Azote liquide

Nos calculs seront faits de la manière suivante : dans un premier temps, calcul du flux de chaleur passant de l'air ambiant au GNL soit ϕA . Ensuite, calcul du flux de chaleur passant du GNL vers l'azote soit ϕB .

Pour qu'il n'y ait pas évaporation, on doit avoir :

$$\phi A \leq \phi B.$$

Cette étude se fera pour le réservoir plein et à différents niveaux.

2.5.1. Détermination des dimensions pour une contenance de 70 l

La forme adoptée est cylindrique.

$$\text{Volume } V = \pi R^2 \cdot l = 70$$

$$\text{Surface } S = 2\pi R^2 + 2\pi Rl = 2\pi R(R+l)$$

Pour avoir un flux faible, on prendra la surface la plus petite possible

$$\text{On a } l = \frac{70}{\pi R^2}$$

$$S = 2\pi R^2 + \frac{2 \cdot 70}{R}$$

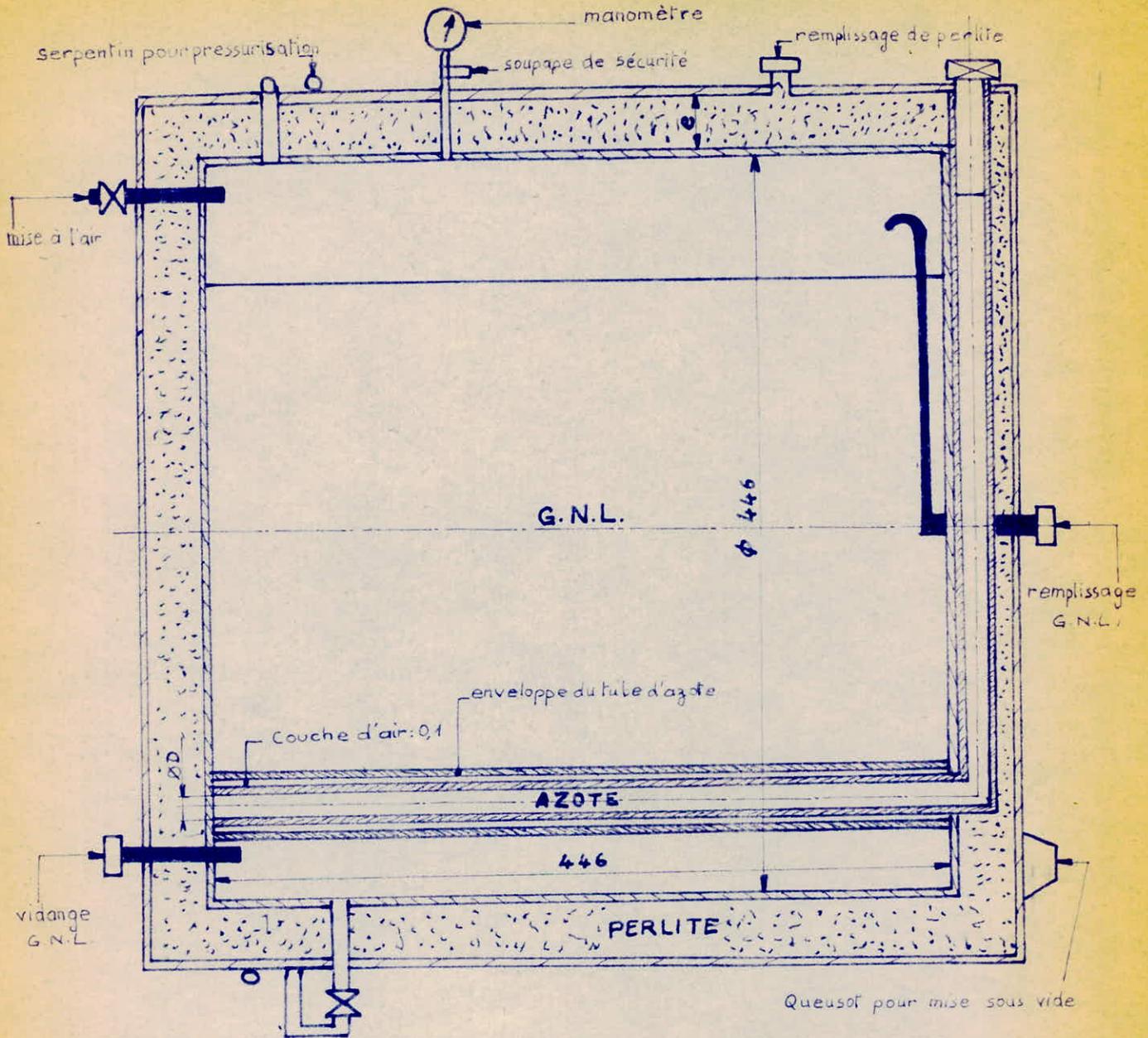


Schéma de Principe de Calcul
du Réservoir de 70 Litres

pour avoir la surface minimum, on dérive S par rapport à R.

$$\frac{ds}{dR} = 4\pi R - \frac{2.70}{R^2} = 0$$

$$R = \frac{70}{2\pi R^2} = \frac{1}{2}$$

$$R^3 = \frac{70}{2\pi}$$

$$R = \sqrt[3]{\frac{70}{2\pi}} = 22,3 \text{ cm}$$

$$R = 22,3 \text{ cm}$$

$$l = 44,6 \text{ cm}$$

A partir de ces dimensions, nous pouvons déterminer les différents flux

a) calcul du coefficient de dilatation à pression constante

$$\beta = \frac{1}{v} \frac{dv}{d\theta} = \frac{1}{\rho} \frac{d\rho}{dT}$$

$$\rho = 0,460 \quad d\rho = 0,0188 \quad ; \quad dT = 13,2$$

Ces valeurs ont été tirées du diagramme de densité établi par KLOCSEK Mc KINLEY

$$\beta = \frac{1}{0,460} \cdot \frac{0,0188}{13,2} = 3,38 \cdot 10^{-3}$$

./.

b) le nombre de GRASHOF
avec $\lambda = 0,179$ kcal/m.h (°)

$$C_p = 0,796 \text{ kcal/kg } (°)$$

$$\mu = 0,428 \text{ kg/m.h à } -162°C$$

$$\rho = 0,460 \text{ kg/dm}^3$$

$$L = ? 0,446 \text{ m}$$

$$Gr = \frac{9,81 \cdot 3,38 \cdot 10 \cdot 182 (0,446)^3}{\frac{0,428}{0,46 \cdot 10^3 \cdot 3600^2}} = 55,1 \cdot 10^{11}$$

c) nombre de Prandtl

$$Pr = \frac{\mu C_p}{\lambda} = \frac{0,428 \times 0,796}{0,179} = 1,904$$

d) nombre de Nusselt

$$\text{car } Gr \cdot Pr > 10^8$$

$$\text{d'où } Nu = 0,17 (Gr \cdot Pr)^{0,33}$$

$$Nu = 0,17 (55,1 \cdot 10^{11} \cdot 1,904)^{0,33}$$

$$Nu = 3720$$

e) calcul du coefficient de convection h

$$h = \frac{\lambda Nu}{D} = \frac{0,179 \cdot 3720}{0,446} = 1495 \text{ Kcal/m}^2 \text{ h } °C$$

2.5.3. Calcul de ψ_A :

$$\psi_A = \psi_1 + \psi_2 = \sum h_i \cdot S_i \cdot dT$$

ψ_1 = flux latéral

ψ_2 flux à travers les bouts

./.

Le flux qui passe de l'air au GNL suit les étapes suivantes :

- convection air-paroi acier
- conduction à travers la paroi d'acier
- conduction à travers la perlite
- conduction à travers la paroi de Nickel-chrome
- convection GNL - Nickel-chrome

Les flux dans toutes les couches sont égaux. Nous pourrions en déduire, de la même manière que pour la ligne cryogénique. Les expressions ϕ_1 et ϕ_2

$$\phi_1 = \frac{2\pi L (T_{air} - T_{GNL})}{\frac{1}{h_{air} R} + \frac{\ln(R/R_1)}{\lambda_{acier}} + \frac{\ln(R_1/R_2)}{\lambda_{perlite}} + \frac{\ln(R_2/R_3)}{\lambda_{Ni-Cr}} + \frac{1}{h_{GNL} R_3}}$$

$$\phi_2 = \frac{2\pi R_2 (T_{air} - T_{GNL})}{\frac{1}{h_{air}} + \frac{e}{\lambda_{acier}} + \frac{e'}{\lambda_{perlite}} + \frac{e}{\lambda_{Ni, Cr}} + \frac{1}{h_{GNL}}}$$

2.3.4. Calcul de ϕ_B

Le processus de calcul est le même que pour ϕ_A

On a :

- convection GNL - paroi acier
- conduction à travers la paroi d'acier
- convection air-paroi d'acier
- conduction à travers l'épaisseur d'acier
- convection air-paroi d'acier
- conduction à travers la paroi d'acier
- convection N₂ liquide - paroi d'acier

Nous en déduisons la relation donnant le flux ϕ_B .

$$\phi_B = \frac{2\pi l (T_{GNL} - T_{N2})}{\frac{1}{h_{GNL} R_1} + \frac{\ln(R_1/R_2)}{\lambda_{acier}} + \frac{1}{h_{air} R_3} + \frac{\ln(R_3/R_4)}{\lambda_{acier}} + \frac{1}{h_{N2} R_4}}$$

./.

2.5.5. Débits de GNL et de N₂ évaporé

$$\dot{m} = \frac{\phi}{L_v}$$

L_v = chaleur de latente de vaporisation ou enthalpie de vaporisation (Mc ADAMS)

pour l'azote : $L_v = 47,7$ cal/g

pour le GNL : $L_v = 124$ cal/g

Nous pouvons ainsi tracer 4 courbes

$$\phi_A = f(e)$$

$$\dot{m}_{\%}(\text{GNL}) = f(e)$$

$$\phi_B = f(R)$$

$$\dot{m}_{N_2} = f(R)$$

Les valeurs de e et de R seront choisies dans le domaine où $\phi_A < \phi_B$ (voir courbes et tableaux planches fig 12).

Nous remarquons que l'évaporation de N₂ est importante (128 g/h pour un flux de 1 cal/s) ; ce qui n'est pas très avantageux. Ceci

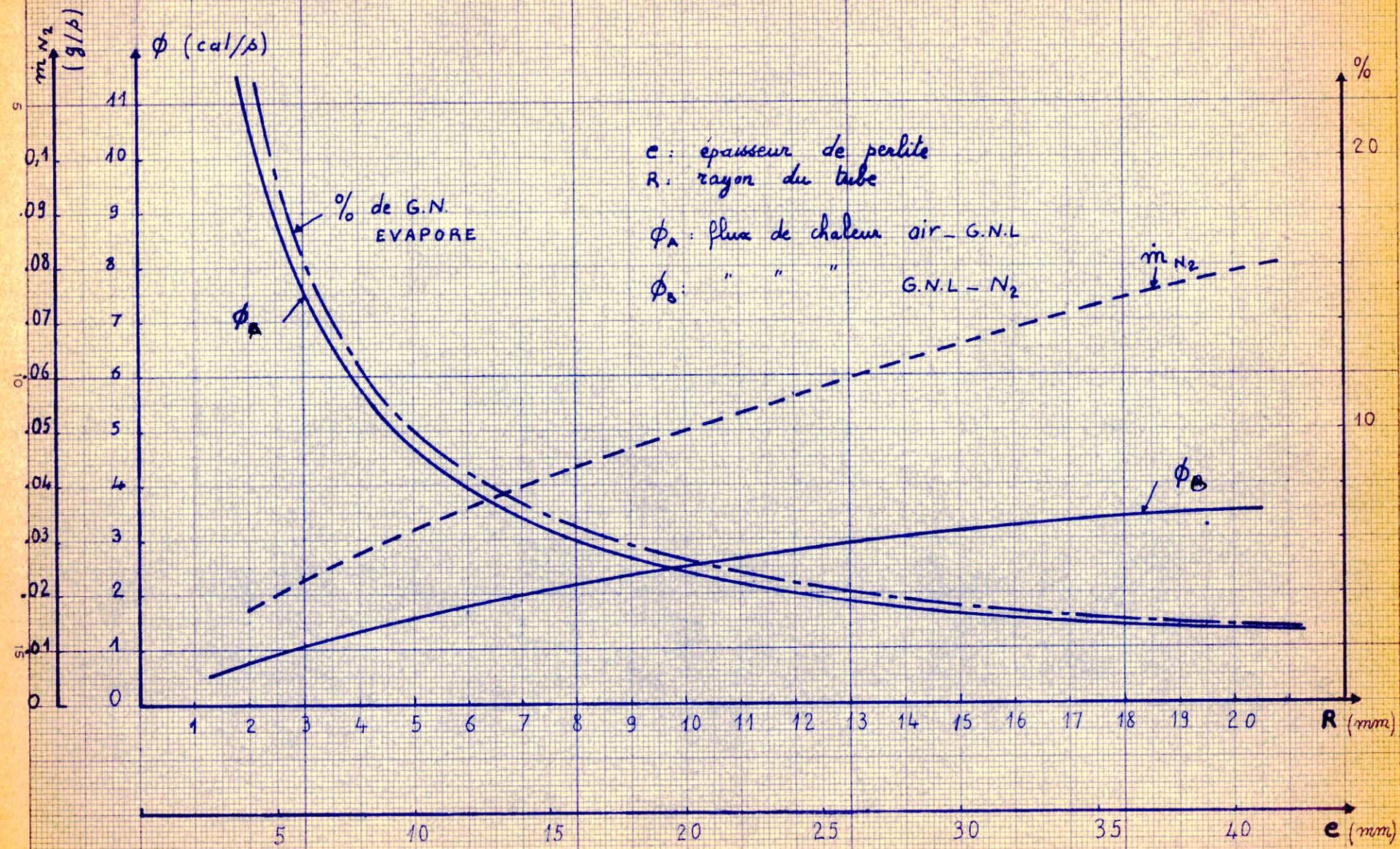
nécessiterait une grande réserve d'azote liquide et par conséquent un grand encombrement.

Cet inconvénient n'étant pas négligeable, nous éviterons l'apport de frigorifiques par l'azote liquide, d'autant plus que le taux d'évaporation du GNL avec super isolation (perlite sous vide) est acceptable.

AIR - GNL			GNL - AZOTE		
e	$\varnothing A$	%	R	$\varnothing B$	m N2
mm	Cal/s.	-	mm	Cal/s.	G/s.
5	9,0	19,45	2	0,89	0,018
7,5	6,1	13,21	3	1,11	0,023
10	4,67	10,1	4	1,31	0,027
12,5	3,79	8,2	5	1,51	0,031
15	3,2	6,91	6	1,69	0,035
17,5	2,77	5,98	7	1,87	0,039
20	2,45	5,3	8	2,05	0,043
22,5	2,21	4,78	9	2,22	0,046
25	2,01	4,35	10	2,38	0,050
27,5	1,85	4	11	2,55	0,053
30	1,71	3,69	12	2,71	0,056
32,5	1,60	3,46	13	2,86	0,060
35	1,50	3,24	14	3,02	0,063
37,5	1,41	3,04	15	3,17	0,066
40	1,34	2,9	16	3,31	0,072
42,5	1,27	2,75	17	3,46	0,075
45	1,21	2,62	18	3,60	0,078
47,5	1,16	2,51	19	3,75	0,081
50	1,12	2,42	20	4,03	0,084

.../...

fig 12



e : épaisseur de perlite

\dot{Q} : flux de chaleur passant de l'air au GNL

$\%$: représente le pourcentage de masse de GNL évaporée.
ce pourcentage est dû à 0 uniquement.

R : rayon du tube réservoir d'azote

\dot{Q}_A : flux de chaleur passant du GNL à l'azote

\hat{m}_{N_2} : masse d'azote évaporée.

2.5.6. Calcul du réservoir par simple isolation en tenant compte de la pressurisation et du volume de GNL.

Hypothèses :

- on néglige les flux de chaleur dus à la conduction à travers les accessoires de remplissage, de vidange, du manomètre, de la pressurisation. On considère uniquement le calcul thermique d'un réservoir et de son enveloppe séparés par une couche de perlite.
- lorsque le niveau du GNL baisse dans le réservoir, on néglige la convection de la couche de GNL évaporé. Comme surface d'échange thermique on prendra la surface de contact du GNL et du réservoir.
- à différents niveaux, on utilisera les formules du cylindre creux pour le calcul du flux.

Les calculs seront faits pour différentes pressions auxquelles correspondent les températures d'ébullition du GNL.

Nous supposons qu'un régulateur de pression garde celle-ci constante pendant tout le stockage.

P kg/cm ²	0,949	1,113	1,614	1,984	4,515
T (°K)	111,16	113,16	118,16	121,16	133,65

Pour $P = 1 \text{ kg/cm}^2$ et $T = 111^\circ\text{K}$, les calculs faits précédemment, nous ont donné en considérant le réservoir plein, un taux d'évaporation de 4 %, ce qui correspond à une épaisseur de perlite de 2,75 cm. Mais pour une contenance de 10 l de GNL, on a un taux d'évaporation élevé. Nous ferons alors l'étude pour une épaisseur de perlite variant de 4 à 5 cm.

La suite des calculs sont menés de la même manière que précédemment, sauf que la surface d'échange thermique varie.

Détermination de la surface latérale et de la surface des bouts. La surface latérale est égale à la longueur de l'arc s multipliée par la longueur du réservoir.

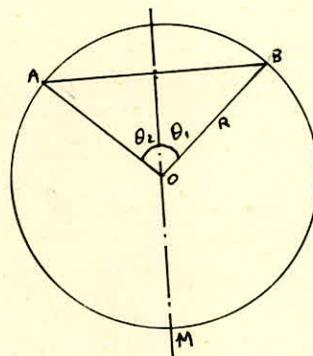
$$s = \int_{\theta_1}^{\theta_2} R \, d\theta$$

$$s = R(\theta_2 - \theta_1)$$

$$\text{mais } \theta_2 = 2\pi - \theta_1$$

$$\text{d'où } s = R(2\pi - \theta_1 - \theta_1)$$

$$s = 2R(\pi - \theta_1)$$



La surface du bout est égale à la surface délimitée par OAMB plus la surface du triangle isocèle OAB.

./.

$$Q_{AMB} = \iint r dr d\theta = \int_0^R r dr \int_{\theta_1}^{\theta_2} d\theta$$

$$Q_{AMB} = R^2 (\pi - \theta_1)$$

$$Q_{AB} = R \sin \theta_1 \cdot R \cos \theta_1$$

$$Q_{AB} = \frac{1}{2} \sin 2\theta_1$$

$$S_2 = Q_{AMB} + Q_{AB} = R^2 (\pi - \theta_1 + \frac{1}{2} \sin 2\theta_1)$$

$$S_2 = R^2 (\pi - \theta_1 + \frac{1}{2} \sin 2\theta_1)$$

Le volume de GNL restant dans le réservoir est :

$$V = 1 \cdot R^2 \cdot (\pi - \theta_1 + \frac{1}{2} \sin 2\theta_1)$$

Nous avons toujours le flux total égal à la somme du flux latéral et du flux à travers les bouts.

$$\phi = \phi_1 + \phi_2 = \text{flux latéral} + \text{flux (bouts)}$$

$$\phi_1 = \frac{(T_{air} - T_{GNL})}{\frac{1}{h_{air} 2\pi R_1} + \frac{\ln(R/R_1)}{\lambda_{acier} 2\pi l} + \frac{\ln(R_1/R_2)}{\lambda_{perlite} 2\pi l} + \frac{\ln(R_2/R_3)}{\lambda_{NC} 2\pi l} + \frac{1}{h_{GNL} S_1}}$$

$$\phi_2 = \frac{2 S_2 (T_{air} - T_{GNL})}{\frac{1}{h_{air}} + \frac{e}{\lambda_{acier}} + \frac{e'}{\lambda_{perlite}} + \frac{e}{\lambda_{NC}} + \frac{1}{h_{GNL}}}$$

Les résultats sont consignés dans le tableau

Interprétation des résultats et discussion.

TABLEAU DONNANT LA VARIATION DU POURCENTAGE DE GNL

Pour 5 valeurs de E (épaisseur de perlite)

E = 4 cm

évaporation en %

V. Litre \ TCNL OK	111,16	113,16	118,16	121,16	123,63
69,193	2,98	2,93	2,85	2,80	2,60
59,299	3,27	2,23	3,14	3,09	2,86
48,315	3,84	3,75	3,60	3,53	3,28
34,838	4,73	4,68	4,55	4,47	4,15
21,355	6,97	6,90	6,71	6,59	6,11
10,353	13,13	12,99	12,63	12,41	11,5

E = 4,25 cm

V litres \ TGNL UK	111,16	113,16	118,16	121,16	133,62
69,193	2,87	2,84	2,76	2,71	2,51
66,258	2,95	2,91	2,83	2,78	2,58
59,299	3,15	3,12	3,03	2,98	2,76
48,315	3,60	3,56	3,46	3,40	3,16
34,838	4,54	4,49	4,36	4,29	3,98
21,355	6,66	6,59	6,40	6,29	5,84
10,353	12,48	12,35	12,00	11,80	10,94

E = 4,50 cm

V litres \ TGNL UK	11,16	113,16	118,16	121,16	133,63
69,193	2,78	2,73	2,68	2,63	2,46
66,258	2,86	2,82	2,74	2,70	2,50
59,299	3,05	3,02	2,93	2,88	2,67
48,315	3,48	3,44	3,34	3,29	3,05
34,839	4,37	4,32	4,20	4,13	3,83
21,355	6,38	6,31	6,13	6,03	5,59
10,353	11,91	11,89	11,45	11,25	10,44

$$E = 4,75 \text{ cm}$$

V. litres \ TGNL °K	111,16	113,16	118,16	121,16	133,63
69,192	2,71	2,68	2,60	2,56	2,37
66,258	2,77	2,74	2,67	2,62	2,43
59,299	2,96	2,93	2,85	2,80	2,60
48,315	3,37	3,33	3,24	3,18	2,95
34,839	4,21	4,17	4,05	3,98	3,69
21,355	6,13	6,06	5,89	5,79	5,37
10,353	11,39	11,27	10,95	10,77	9,98

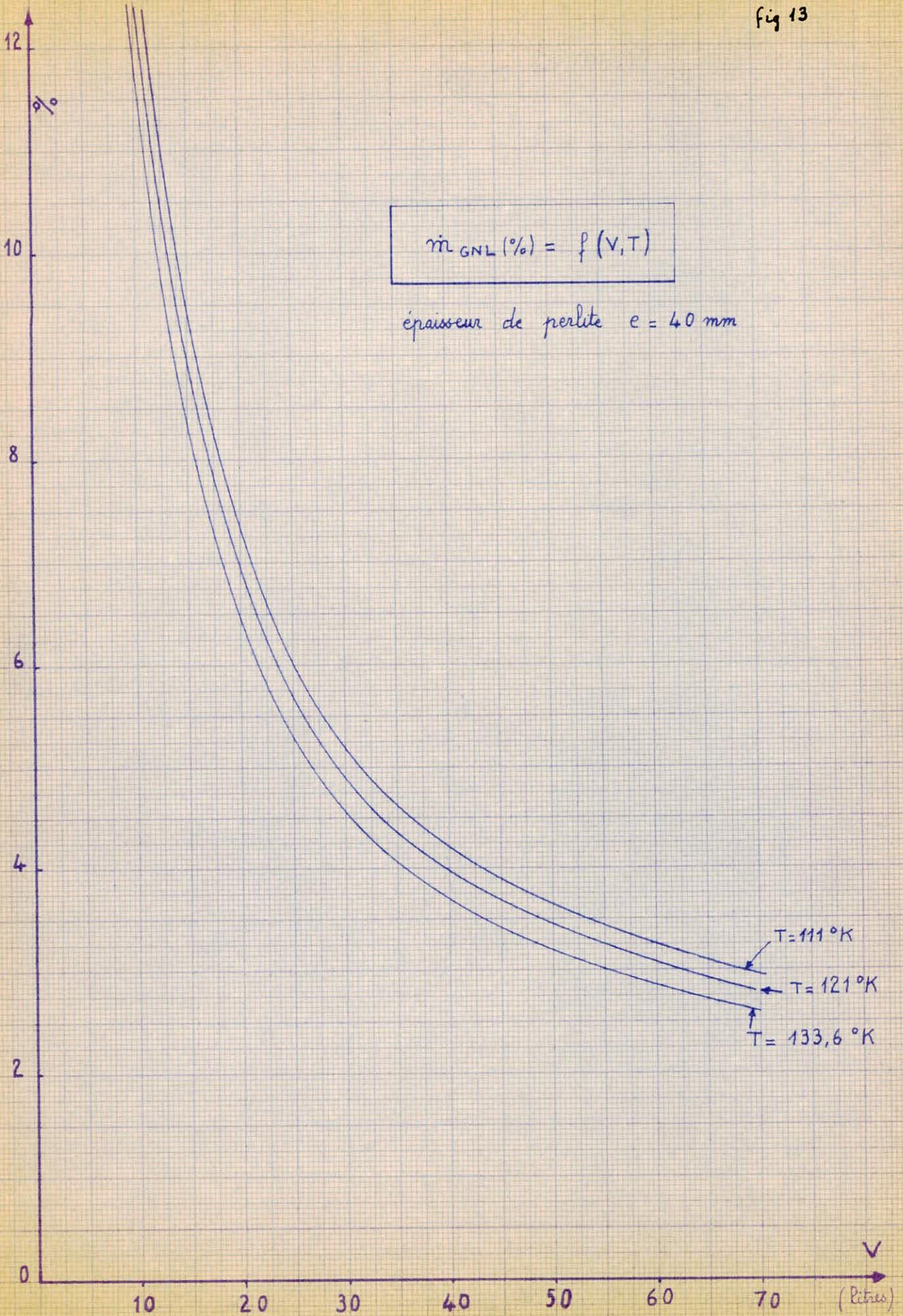
$$E = 5 \text{ cm}$$

V. Litres \ TGNL °K	111,16	113,16	118,16	121,16	133,63
69,193	2,64	2,61	2,54	2,49	2,31
66,258	2,70	2,67	2,60	2,55	2,37
59,299	2,88	2,85	2,77	2,72	2,52
48,315	3,27	3,23	3,14	3,09	2,86
34,838	4,08	4,03	3,92	3,85	3,57
21,355	5,91	5,84	5,68	5,58	5,18
10,353	10,92	10,81	10,51	10,33	9,52

Fig 13

$$m_{GNL}(\%) = f(V, T)$$

épaisseur de perlite $e = 40 \text{ mm}$



D'après la courbe $\dot{m}_{\text{GNL}} (\%) = f(V, T)$ nous remarquons que la pressurisation ne change pas le taux d'évaporation. Ce dernier décroît quand la pression augmente mais dans de faibles proportions. Nous utiliserons donc la pressurisation uniquement pour le transvasement du liquide.

Nous remarquons d'autre part, que le taux d'évaporation augmente quand le niveau dans le réservoir baisse. Il ne faut jamais vider le réservoir jusqu'à 10 l car le taux devient $\dot{m} (\%) = 10$. Le taux appréciable est de 6 % ce qui correspond à une contenance de 20 l et une épaisseur de perlite supérieure ou égale à 7 cm.

La variation de l'épaisseur de perlite ne donne pas de grandes variations du taux d'évaporation pour une contenance supérieure à 20 l. Nous avons choisit la première valeur nous donnant 6 % pour 20l.

2.6. Calcul d'un serpentín pour l'alimentation d'un moteur R 16.

Le moteur de R.16. doit être alimenté en gaz naturel à partir d'un réservoir cryogénique de 45 litres contenant du G.N.L.

La consommation en essence du moteur R.16. est de 12 l/h, cette valeur représente une consommation maximale du moteur

En G.N.L. la consommation est de :

$$\dot{m}_{\text{GNL}} = \dot{m}(\text{essence}) \cdot \frac{P_{ci}(\text{essence}) \cdot P(\text{essence})}{P_{ci}(\text{GNL}) \cdot P(\text{GNL})}$$

Connaissant la chaleur de vaporisation du GNL, $L_v = 124 \text{ cal/g}$ nous pourrions calculer le flux de chaleur nécessaire à la vaporisation de GNL.

$$\phi = \dot{m}(\text{GNL}) \cdot L_v$$

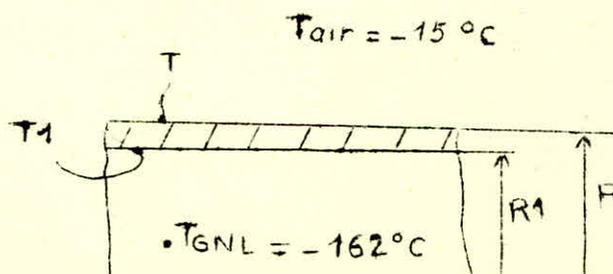
D'autre part, ce flux sera celui qui passe de l'air ambiant au GNL à travers la surface du serpentín soit :

$$\phi = K \cdot S \cdot \Delta T$$

où K est la résistance thermique

Hypothèses de calcul

- on considère que le GNL reste liquide jusqu'à la sortie du serpentín
- on considère que le serpentín est une ligne droite.



a) convection naturelle air-paroi

$$\phi = h_1 \cdot 2\pi \cdot R \cdot L \cdot (T_{air} - T)$$

b) conduction à travers l'épaisseur du tube en cuivre

$$\phi = \frac{T_1 - T_2}{\frac{\ln(R/R_1)}{\lambda \cdot 2\pi \cdot L}}$$

c) convection paroi-GNL

$$\phi = h_2 \cdot 2\pi \cdot R_1 \cdot L \cdot (T_1 - T_{GNL})$$

d où finalement

$$\phi = \frac{L \cdot (T_{air} - T_{GNL})}{\frac{1}{h_1 \cdot 2 \cdot R} + \frac{\ln(R/R_1)}{2} + \frac{1}{2 \cdot h_2 \cdot R_1}}$$

et pour la longueur

$$L = \frac{\phi \left(\frac{1}{h_1 \cdot R} + \ln(R/R_1) + \frac{1}{h_2 \cdot R_1} \right)}{2\pi \cdot (T_{air} - T_{GNL})}$$

Application numérique

On choisit un tube de diamètre 6/8; connaissant le débit de GNL nécessaire c'est à dire :

$$\dot{m}_{GNL} = 13 \cdot \frac{10200}{11000} \cdot \frac{0,76}{0,46}$$

$$\begin{aligned} \dot{m}_{GNL} &= 19,9 \text{ l/h} \\ &= 2,6 \text{ g/s} \end{aligned}$$

Connaissant cette valeur on tire de l'abaque fig.

$$h_2 = 550 \text{ kcal/m}^2 \cdot \text{h} \cdot ^\circ\text{C}.$$

pour le cuivre $\lambda = 330 \text{ kcal/m} \cdot \text{h} \cdot ^\circ\text{C}$

$$T_{\text{air}} = 15^\circ\text{C} = 228 \text{ }^\circ\text{K}$$

On a pris une température aussi basse pour avoir le débit nécessaire en périodes très froides.

$$h_1 = 29.6 \text{ cal/m}^2 \cdot \text{s} \cdot ^\circ\text{C}$$

$$R = 0,004 \text{ m}$$

$$R_1 = 0,003 \text{ m}$$

$$L_v = 124 \text{ cal/g}$$

$$\dot{Q} = \dot{m} \text{ GNL} \cdot L_v$$

$$= 124 \times 2,6 = 322 \text{ cal/s}$$

Ce qui donne une longueur de :

$$L = 3,71 \text{ m}$$

Détermination de l'encombrement

Pour enrouler le serpentin, on prend un pas de 2 cm, une inclinaison de 60 degrés et un diamètre d'enroulement $D = 20 \text{ cm}$.

Longueur d'une spire :

$$\frac{\pi D \times 2}{\sqrt{3}} = 72,5 \text{ cm}$$

nombre de spires

$$n = \frac{3,71}{0,725} = 5$$

Ce qui donne une longueur du serpentin égale à 14 cm.

CHAPITRE III

ESSAIS ET MESURES

3.1. Remplissage du réservoir de 130 litres

Le remplissage du 130 l se fait à partir d'un autre réservoir de 600 l. Ce transvasement nécessite une pressurisation du 600 l pour l'écoulement du liquide. Le principe est le suivant : on prélève par gravité un peu de liquide venant du réservoir, puis on le vaporise et on le réchauffe dans un échangeur atmosphérique, le gaz est alors réinjecté dans la phase gazeuse. La valeur d'utilisation de la pression sera de l'ordre de 1 bar.

Cette opération terminée on passe au transvasement du liquide, les manchettes des vannes sont dans les positions suivantes :

Mise à l'air		Phase liquide	
600	130	600	130
F	0	0	0

Il est à noter que la mise en température des parties des matériels constitue un temps mort et une dépense de liquide très importante.

3.2. Mise en marche

3.2.1. Vérification

Avant chaque mise en marche, il faut vérifier si l'ensemble est bien monté, raccords étanches colliers bien serrés, niveau dans le réservoir de 130 l, les dégazeurs en position ouvert, le système de récupération bien fixé.

Cette vérification est nécessaire car lors de la mise en service aucun démontage n'est possible.

3.2.2. Manoeuvres à effectuer

- fermeture de la vanne de mise à l'air du 130 l
- ouverture de l'électro-vanne
- mise sous pression du 130 l avec une bouteille d'azote technique
- ouverture du dégazeur d'entrée
- by-pass ouvert, robinet turbine fermé
- attendre la phase liquide pour fermer le by-pass et ouvrir robinet turbine. Ces 2 opérations se font progressivement.
- vérifier la déviation du débitmètre : si la turbine est bloquée, la nettoyer la réchauffer pour évaporer la vapeur d'eau qu'il peut y avoir.
- attendre la stabilisation de l'écoulement et ne pas oublier de dégazer de temps en temps.
- enregistrer les différentes températures.

3.2.3. Enregistreur de température

Nous devons utiliser un enregistreur à 12 voies. Mais ce dernier n'était pas fidèle.

L'appareil utilisé est un monovoie. Les thermocouples sont raccordés à l'enregistreur par une boîte à plots.

Ainsi les mesures de températures sont faites successivement. Une $E_{m} \text{ en } (\text{mV})$ est relevée. A cette valeur correspond une température.

Pour chaque mesure, on relève la température ambiante car le mesureur n'est pas compensé.

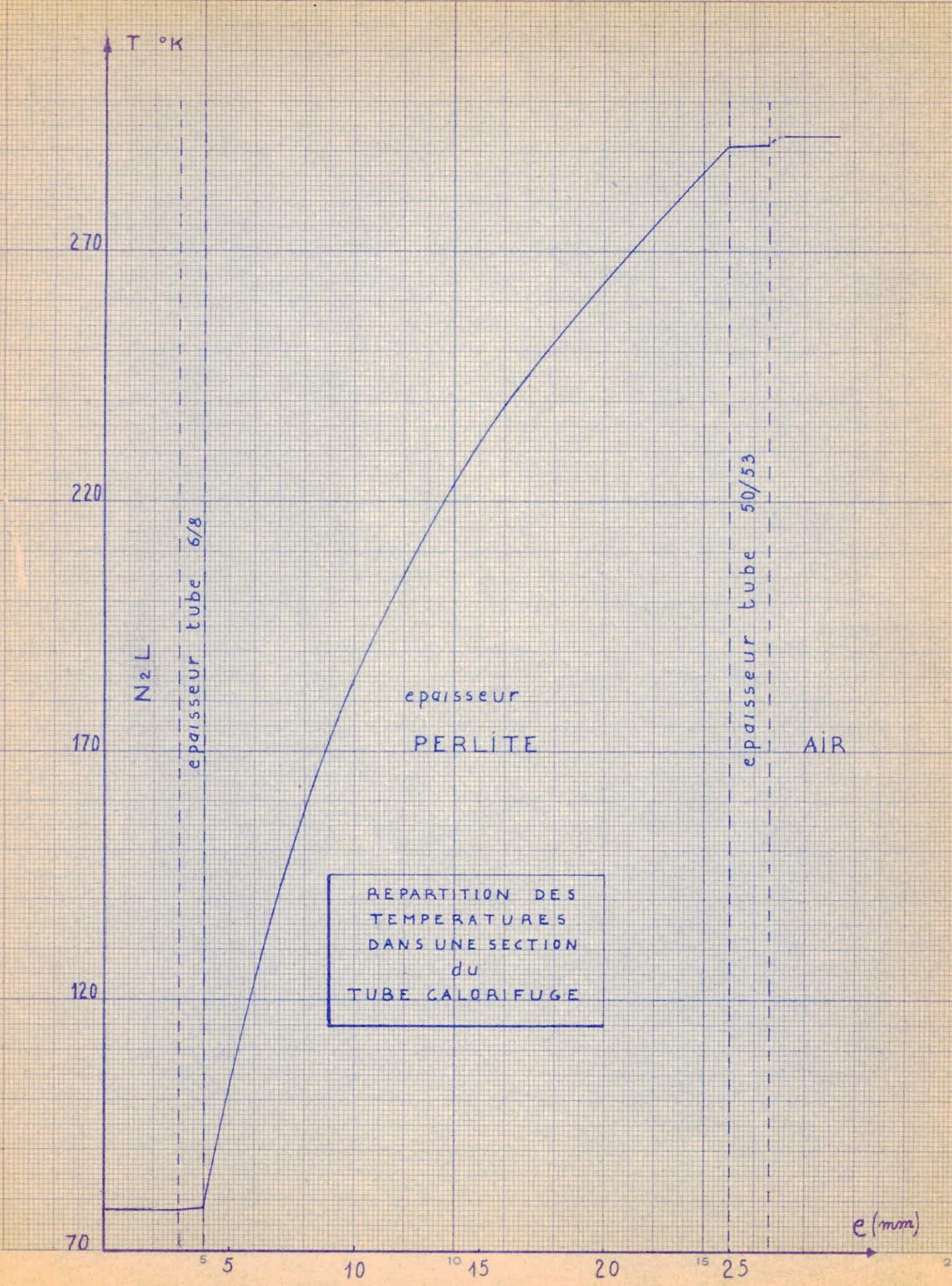
3.3. Résultats obtenus pour l'azote

L'enregistreur n'est pas compensé, nous devons ajouter la tension correspondant à la température ambiante pour le Fer-Constantan et le chromel-alumel pour 25°C et un débit de 100 l/h on a :

Fer-constantan = 1,31 mV

Chromel alumel = 1 mV.

	mV	mV compensée	température mesurées	températures calculées (°C)
Tube 6/8 à 350	-9,02	- 7,97	- 194	-194,89
Intérieur perlite	-1,3	- 0,3	- 13	
tube 50/53 à 350	-0,2	0,8	20	+ 18
tube 50/53 à 650	-0,2	0,8	+ 20	+ 18
intérieur perlite	-1,4	0,4	- 18	
Sortie liquide	- 9,04	- 7,99	-195	-195



tube 6/8 à 650	-9,02	-7,97	- 194	-194,89
tube 6/8 à 950	-9,02	-7,97	-194	-194,89

Nous pouvons remarquer que les températures mesurées correspondent bien aux calculs.

Ces valeurs sont prises avec de la perlite sous a r.

Un essai a été fait avec de la perlite sous vide.

Nous avons enregistré des températures sensiblement égales. L'écart est de l'ordre du degré. Les calculs nous donnent aussi un écart de 1 degré environ.

Nous pouvons en déduire que le vide n'est pas d'une grande importance. La perlite à elle seule suffit à isoler la ligne cryogénique.

3.4. Remarques

3.4.1. Mesure du débit gazeux

Il nous a été impossible de mesurer le débit de gaz évaporé. Ceci vient du fait que le dégazeur est trop court. Le liquide gicle du robinet de dégazage et se vaporise, ce qui fausse notre mesure. De plus, pendant l'essai, le robinet cryogénique de la turbine est difficile à manipuler et le réglage du débit pour différentes mesures n'est pas obtenu.

Un autre point gêne la mesure du débit gazeux. Lors de la fermeture du by-pass on note un accroissement régulier de la température. Ce qui nous amène à dire que le liquide ne circule pas dans la conduite et que l'électrovanne s'est fermé.

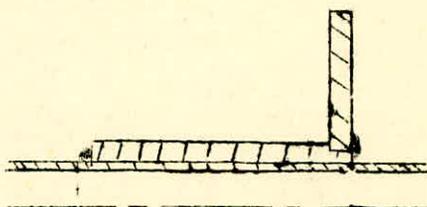
Ce phénomène peut s'expliquer de la manière suivante. Lors de la fermeture du by-pass, il ya un retour de liquide qui ferme le clapet de l'électrovanne.

3.4.2. Fixation des thermocouples et des flasques

La fixation des thermocouples et des flasques a été faite par soudage à l'étain ; ce qui présente un énorme inconvénient. Lors de la mise en marche, les deux matériaux ayant des coefficients de contraction différent, on observe un décollage de la soudure. Nous sommes alors obligés de faire le vide continu dans l'enceinte.

Les flasques ont une épaisseur faible (3mm) sont soudés à l'étain sur le tube 6/8. La moindre flexion (son propre poids) décolle la soudure.

Pour remédier à ce défaut, on pouvait prévoir des flasques qui peuvent être basés sur le tube de 6/8 (figure ci-dessous).



Les flasques sont prévus en deux parties pour une raison d'économie.

3.4.3. Mise en froid

Pour une conduite, il faudra attendre plusieurs minutes avant qu'un liquide franc puisse passer d'une extrémité à l'autre. L'allégement des parties destinées à être refroidies doit être recherché dans un souci d'économie, autrement dit réduction de la longueur des éléments, de l'épaisseur de leur paroi.

Il était possible de réduire la masse du système en remplaçant les boes inox et certaines soudures qui nécessitaient d'autres pièces par des tubes d'acier inoxydable filetés aux extrémités au pas du gaz l'un à gauche, l'autre à droite. Ce montage présentera l'inconvénient d'être rigide contrairement au celui qui existe et qui est plus souple.

CONCLUSION

L'étude nous a permis de nous familiariser avec le matériel cryogénique, soient : les robinets cryogéniques, acier inoxydable (soudure et usinage), thermocouples, ainsi qu'avec les fluides cryogéniques et des précautions à prendre.

Les résultats obtenus sont satisfaisants. Néanmoins, plusieurs améliorations peuvent être apportées:

- pour une mesure prévoir 2 thermocouples opposés. Lorsque l'un d'eux est défectueux on utilisera le second.
- allègement du système
- standardisation de tous les raccords de manière à les interchanger.

D'autre part, des essais avec différents calorifuges (feuilles d'aluminium, vide) auraient pu compléter cette étude.

Il est à noter que nous devions faire l'étude du flux en fonction de la pression (1 bar à 10^{-6} bar) ; mais cela n'a pas été possible par manque d'instrument de mesure adéquat (jauge PIRANI)

MESUREUR DEBIMETRIQUE

Type: A1340

N°: 701

liquide: eau

t° = + 20°C

densite: 1

viscosite: 1 cSt

7973	13,88	2555	809
7965	18,53	2553	606
7958	27,70	2550	405
7984	55,65	2559	201
8020	112,17	2570	100
8001	186,45	2564	60

2600

2560

2520

Coefficient
du mesurateur

dm³/h

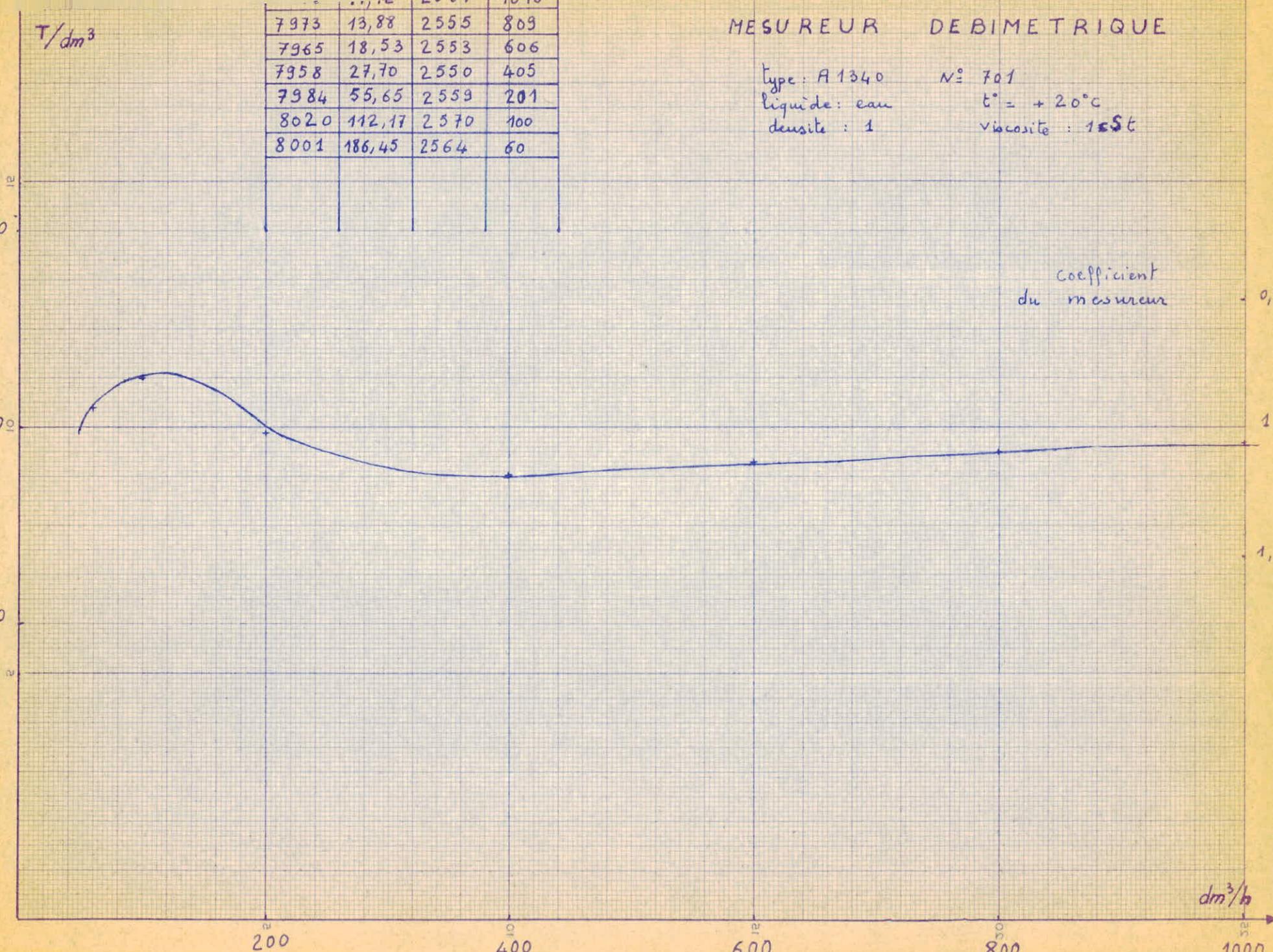
200

400

600

800

1000



19958	37,73	6397	297
19988	56,68	6406	198
20046	113,62	6425	99
20103	227,33	6443	49
19885	563,12	6373	20

MESUREUR DEBITMETRIQUE

type : A937 N° 658
 liquide : eau t = +20°C
 densité : 1 viscosité : 1 cst

