

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

5/94

وزارة التربية الوطنية
MINISTERE DE L'EDUCATION NATIONALE

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

DEPARTEMENT GENIE-MECANIQUE

المدرسة الوطنية المتعددة التخصصات
BIBLIOTHEQUE — المكتبة
Ecole Nationale Polytechnique

PROJET DE FIN D'ETUDES

SUJET

CONCEPTION ET REALISATION D' UN
CRYOSTAT EXPERIMENTAL POUR L' ETUDE
DES ECHANGES DE CHALEUR EN CRYOGENIE

Proposé par :

Mr . O.KHEMIS

Etudié par :

Mr . M. BENABDERRAHMANE

Mr . M. AIT SAADA

Dirigé par :

Mr. O.KHEMIS

Mr . B.GUERGUEB

PROMOTION

juin 94

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التربية الوطنية

MINISTERE DE L'EDUCATION NATIONALE

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

DEPARTEMENT

GENIE-MECANIQUE

المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
المكتبة — BIBLIOTHEQUE
Ecole Nationale Polytechnique

PROJET DE FIN D'ETUDES

SUJET

CONCEPTION ET REALISATION D' UN
CRYOSTAT EXPERIMENTAL POUR L' ETUDE
DES ECHANGES DE CHALEUR EN CRYOGENIE

Proposé par :

Mr . O.KHEMIS

Etudié par :

Mr . M. BENABDERRAHMANE

Mr . M. AIT SAADA

Dirigé par :

Mr.O.KHEMIS

Mr . B.GUERGUEB

PROMOTION

juin 94

"إِنَّا عَرَضْنَا الْأَمَانَةَ عَلَى السَّمَاوَاتِ وَالْأَرْضِ
وَالْجِبَالِ فَأَبَيْنَ أَنْ يَحْمِلْنَهَا وَأَشْفَقْنَ مِنْهَا
وَحَمَلَهَا الْإِنْسَانُ إِنَّهُ كَانَ ظَلُومًا جَهُولًا"
الأحزاب (72).

"إلي الذين يحافظون على الأمانة"



DEDICACE

Je dédie ce modeste travail à :

- Mes très chers parents,
- Mes frères,
- toute la famille,
- et mes amis les plus proches

مبارك
بن
بن

DEDICACE

Je dédie ce memoire à :

- Mes très chers parents,
- Mes frères,
- Mes soeurs,
- La petite Asma,
- toute la famille,
- et tous mes amis les plus proches.

MOHAMED

Remerciements

Nous remercions M^{er} khémis, notre promoteur, qui a bien voulu nous prendre en charge avec sérieux et orienter notre travail par ses conseils et ses mises au point qui ont été d'un apport précieux pour l'achèvement de notre mémoire. Notre promoteur mérite une reconnaissance sans limite pour la documentation exhaustive qu'il nous a fourni et sur laquelle il n'a pas lésiné.

M^{er} Guergueb, notre copromoteur, pour sa part n'a pas hésité à mettre à notre disposition tous les moyens à même de nous permettre de réaliser le côté pratique de notre travail à savoir la confection d'un cryostat dans des conditions plus que satisfaisantes.

Que nos promoteurs ainsi que l'ensemble du corps des enseignants du département de Génie Mécanique qui ont veillé au bon déroulement de notre formation retrouve ici l'expression de notre reconnaissance la plus vive .

nos Remerciements vont aussi à:

- M^{er} Benbraika, chef des ateliers du département de Génie Mécanique, qui nous a facilité la tâche d'acquisition des moyens de réalisation du cryostat.

- L'ensemble des agents de l'atelier de Génie Mécanique qui ont été d'une aide sans faille dans l'usinage des pièces composant le cryostat .

- M^{lle} Ayati, du centre de cryogénie de L'U.S.T.H.B, nous a encouragé tant par ses conseils ou ses orientations, nous la remercions ainsi que les employés du centre qui nous ont fourni aimablement et gratuitement de l'Azote liquide.

- M^{er} Mébarka, technicien à La C.D.T.N, soit assuré de notre sincère gratitude pour les interventions utiles et surtout pour la documentation dont il nous a facilité l'acquisition.

- Ceux de l'entreprise E.N.G.I de Réghaia n'ont aménagé aucun efforts dans le soudage du cryostat et la réalisation du vide. M^{er} Bacha, M^{er} Amallou, M^{er} Redjdel, M^{me} Ousallah nous ont à plus d'une fois prêté main forte dans notre travail.

Enfin, nous remercierons particulièrement M^{er} HAMADAS, Directeur d'exploitation de l'entreprise E.N.G.I, qui a montré une promptitude à notre égard dès que nous lui avons exposé l'idée d'achever notre travail dans son unité.

الملخص :

الهدف من هذا الإنجاز هو إدراك و تحقيق كريسطا تجريبي يحفظ فيه مائع كيروجيني "أزوت سائل" لأجل دراسة التبادل الحراري بدرجات منخفضة.

RESUME :

L'objectif de ce travail est la conception et réalisation un cryostat experimental pour la conservation d'un fluide cryogenique "Azote liquide" et l'etude des échanges de chaleur a basses temperatures.

ABSTRACT :

This word is devoted to the stady, the design and the realisation the experimentale cryostat for conservation the cryogenic fluid " Liquid netrogen" stady the heat echange at low temperature.

SOMMAIRE

	page
Introduction	1
Chapitre I Les fluides cryogéniques	
I.1 Introduction	8
I.2 Fluides cryogéniques.....	8
I.3 Propriétés générales de l'azote	12
I.4 Précaution de manipulation des liquides cryogéniques	15
Chapitre II Conception & réalisation du cryostat	
II.1 Introduction	20
II.2 Généralités	20
II.3 Propriétés générales des matériaux à basse température	21
II.3.1 Propriété mécanique	21
II.3.2 Propriété thermique	21
II.3.3 Propriété électrique	21
II.4 Matériaux utilisés en cryogénie	25
II.5 La conception	27
II.5.1 Sélection des Matériaux	28
II.5.2 Acier inoxydable.....	29
II.5.3 Calcul des enveloppes	31
II.6 La réalisation	34
II.6.1 L'assemblage du cryostat.....	34
II.6.2 Vérification primaire de l'étanchéité des cordons de soudure.....	36
II.6.3 Traitement de surface des tôles et des parois exposées au vide.....	37
II.6.4 Assemblage des pièces composant le cryostat.	37
II.7 Conclusion.....	38
Chapitre III Isolation thermique dans le cryostat	
III.1 Introduction	40
III.2 Différents types d'isolation	40
III.3 Technique d'isolation du vide	43
III.4 Domaine d'utilisation et le choix des pompes à vide	45
III.5 Stabilité du vide	45
III.6 Obtention du vide dans le cryostat	46
III.7 Calcul du temps de pompage	47
Chapitre IV Etude de l'échange thermique parfait dans le cryostat .	
IV.1 Etude théorique.....	50

IV.1.1	Introduction	50
IV.1.2	Echange thermique dans le col d'un cryostat	50
IV.1.3	Echange thermique parfait sans rayonnement au col	51
IV.1.3.1	bilan énergétique	51
IV.1.3.2	Evaluation des différents flux de chaleur provoquant l'évaporation de l'azote liquide	57
IV.1.4	Echange thermique parfait avec rayonnement au col	63
IV.1.4.1	Bilan énergétique	63
IV.1.5	Résultat théorique	63
IV.3	Conclusion	72
Chapitre V	Description générale du liquéfacteur d'air PLA 107 et mise en position des différents problèmes de sa remise en marche.	
V.1	Introduction	72
V.2	Caractéristiques techniques	72
V.3	Processus interne du liquéfacteur	73
V.4	Description générale des organes mécaniques ...	76
V.5	Système d'huile de graissage	78
V.6	Système de gaz	81
V.7	Pression de gaz dans la machine	82
V.8	Sécurité	84
V.9	Equipement électrique	85
V.10	Enumération des différents problèmes de la remise en marche du liquéfacteur	85
V.11	Suggestion	87
Chapitre VI	Conclusion générale	
	Conclusion.....	89

INTRODUCTION GENERALE.

Au siècle dernier, les savants ont entamé un travail acharné sur la liquéfaction des gaz considérés jusque là comme permanents (hydrogène, oxygène, hélium, azote, etc...). En 1877, Cailletet réussit à produire un brouillard d'air liquide, la même année à Genève, Pietet obtient un jet d'oxygène en quantité suffisante pour étudier les propriétés physico-chimiques. En 1895, Ramsay réussit à isoler de l'Hélium gazeux qui sera liquéfié treize ans plus tard par Kamerlingh-onnes, maître d'oeuvre de la supraconductivité. En 1898, Dewar produit de l'oxygène liquide recueilli dans un vase en verre à double parois argentées, isolées par le vide. Ce nouveau domaine de recherche tout à fait nouveau pour les chercheurs a initié une nouvelle spécialité appelée "cryogénie", depuis cette technique de production des basses températures (moins de 120 K) s'est aiguisée au fil du temps pour devenir finalement un outil incontournable de recherche et de production dans des domaines variés comme l'Agronomie, l'Industrie, Médecine et autres...

Actuellement, la cryogénie (production des basses températures) s'occupe de façon primordiale de deux grandes applications technologiques qui n'arrêtent pas de révéler ses secrets :

- 1-L'exploitation d'un changement de phase.
- 2-l'exploitation d'un phénomène spécifique aux basses températures.

La première s'occupe de :

- La liquéfaction des gaz pour obtenir un fluide liquide dense, sous faible pression, facile à stocker, à transporter et à utiliser.
- La séparation de gaz liquéfiés par distillation fractionnée,
- Le cryopompage par solidification de gaz sur une paroi très

froide,

- La purification par cryodépôt et cryosorption.

La seconde s'occupe de :

- La surgélation et la cryoconservation,
- La réduction de l'agitation thermique des molécules d'un corps solide,
- La supraconductivité.

Les gaz liquifiés, appelés encore fluides cryogéniques, comme l'azote liquide, l'hydrogène liquide, l'hélium liquide ..., sont largement utilisés dans divers disciplines scientifiques.

Leur stockage se pose en même que leur production, à cause de leur faible chaleur de vaporisation .
Pictet a utilisé de la sciure de bois et des tissus pour résoudre le problème de l'isolation thermique des récipients de stockage. Darsonval et Dewar ont utilisés le même vase, déjà cité, pour stocker respectivement du chlore de méthyle et de l'hydrogène liquide. L'application technologique des fluides cryogéniques dans le cryofretage (emmanchement de 2 pièces dont l'une est refroidie à l'azote liquide), dans la réalisation des cryotransformateurs, dans la conservation de semences et des aliments de consommation, dans l'alimentation de fusées et de piles de combustibles et d'autres... a porté la recherche dans ses différentes disciplines à une dimension encore inespérée il y a quelque temps.

Enfin la cryotechnologie qui a engendré les appareils de production, de transfert et de stockage des cryofluides, ainsi que les appareils d'expérimentation à basse température est fortement liée à d'autres disciplines qui ont leur importance et sans lesquelles elle ne peut exister, telles que :

- la fabrication mécanique,

- la thermodynamique,
- la mécanique des fluides,
- le transfert thermique et la technique d'isolation .

Le cryostat qui est un appareil réservé au stockage des fluides cryogéniques ou à l'étude expérimentale d'un phénomène physique à basse température, constitue l'un des piliers de la cryogénie.

Dans la construction d'un cryostat, le souci majeur est de minimiser les entrées de chaleur du milieu extérieur vers le fluide cryogénique. Ce transfert thermique couplé est assez difficile à étudier par un modèle théorique simple. Parmi les premiers travaux dans ce domaine, on peut citer celui de Sydoriak qui a étudié l'influence de l'effet de la réfrigération du col des cryostats ou l'effet de la récupération de l'enthalpie des vapeurs froide d'hélium par le col. Wexler a établi, pour un échange parfait entre le gaz et les parois du col, les relations qui permettent une généralisation du phénomène aux conteneurs d'azote, d'hydrogène et d'hélium.

Dans le cadre de notre projet de fin d'étude, nous avons fixé comme objectif de concevoir et de réaliser un cryostat simple, en acier inoxydable, composé de deux cylindres concentriques avec une isolation thermique sous vide moyen. Ce cryostat est réservé à l'étude expérimentale du modèle théorique simple de transfert thermique choisi. Effectivement, nous avons considéré l'échange de chaleur parfait entre le col et les vapeurs froides produites par l'ébullition de l'azote liquide conservé, ce modèle combine, sous hypothèses simplificatrices, deux modes de transfert thermique : la conduction et le rayonnement.

Enfin, les matériaux et les moyens de fabrication des différentes pièces du cryostat sont exploités au niveau de l'E.N.P à l'atelier de Génie mécanique et l'assemblage des pièces par soudage, ainsi que l'obtention du vide sont réalisés grâce à

l'aide technique trouvé au niveau de l'Entreprise nationale des gaz industriels (E.N.G.I). Mais la disponibilité de l'azote liquide est nécessaire pour la réalisation de la partie expérimentale de notre étude. Au niveau de l'E.N.P, il existe des liquéfacteurs produisant de l'air liquide ayant une température très proche de celle de l'azote liquide.

Les systèmes cryogéniques en panne, sollicitent la remise en marche. Nous nous évertuerons à mettre en évidence les problèmes et les solutions correspondantes assurant le refonctionnement de ces appareils de production.

Ce présent travail est composé de six chapitres fortement liés pour mettre en évidence l'objectif du projet :

* Le premier chapitre introduit les propriétés générales des fluides cryogéniques stockés dans les cryostats; une attention sera réservée à l'azote liquide.

* Le deuxième chapitre porte sur la conception et la réalisation du cryostat.

* Le troisième chapitre traite la qualité de l'isolation du réservoir.

* Le quatrième chapitre traite l'étude théorique du modèle thermique adopté à savoir, l'échange parfait de chaleur entre l'azote gazeux et le col.

* Le cinquième chapitre est réservé à la description des différents composants du liquéfacteur d'air liquide PLA 107 et à l'énumération soignée des difficultés variées de la remise en marche d'un tel appareil. Enfin, nous terminons par une conclusion générale.

CHAPITRE I

LES FLUIDES CRYOGENIQUES

SOMMAIRE DU CHAPITRE I

	page
I.1 Introduction	8
I.2 Fluides cryogéniques	8
I.2.1 Méthane liquide	8
I.2.2 Air liquide	10
I.2.3 Oxygène liquide	10
I.2.4 Argon liquide	11
I.2.5 Azote liquide	11
I.2.6 Hydrogène liquide	11
I.2.7 Hélium liquide	11
I.3 Les propriétés thermique de l'azote	12
I.4 Précaution de manipulation des liquide cryogéniques..	15

page

Tableau N°1	"Les propriétés physique des principaux fluides cryogéniques"	9
Tableau N°2	"Composition de l'air atmosphérique"	10
Tableau N°3	"chaleur de vaporisation de l'azote liquide"....	13
Tableau N°4	"Conductivité thermique de l'azote liquide"	13
Tableau N°5	"Conductivité thermique de l'azote gazeux"	13
Tableau N°6	"La variation de chaleur spécifique en fonction de la température"	13
Tableau N°7	"La densité d'azote liquide et L'azote vapeur" à saturation.....	14
Tableau N°8	"Variation de la viscosité d'azote liquide"	14

I-1 Introduction :

Un cryofluide est un gaz liquéfié à une très basse température, dans un domaine allant de 0 à 120 K. Il est conservé à l'état liquide dans des récipients appelés "cryostats pour l'expérimentation dans les laboratoires, et contenaires pour le stockage dans l'industrie".

Nous désignons généralement les liquides cryogéniques par leurs symboles précédés de la lettre L :

L N₂ (azote liquide), L O₂ (oxygène liquide) ,L He (Hélium liquide) ,L H₂ (Hydrogène liquide) etc

Chaque fluide cryogénique pose ses propres problèmes de manipulation; pour éviter ces risques qui peuvent être dangereux, il est nécessaire d'étudier en détail les Propriétés physico-chimiques et thermodynamiques.

Ces Propriétés se basent sur les facteurs qui influent sur la sécurité de stockage et leurs utilisation.

I-2 Fluides cryogéniques :

Les principaux cryofluides utilisés dans les applications particulières aux laboratoires ou en industrie seront examinés par ordre de liquéfaction :

(Le tableau N°1) englobe les Propriétés physiques des fluides.

I-2-1 Méthane liquide :[4]

Le Méthane est un gaz inflammable, non toxique; sa température d'ébullition est de 111,7 K (- 161,3°c).

Il est toxique en présence de l'air.

Le Méthane est utilisé en Algérie dans Différents domaines par exemple : réfrigérant pour la liquéfaction du gaz naturel.

		HELIUM	HYDROGENE	NEON	AZOTE	OXYGENE	ARGON	METANE
Masse Moléculaire (g)		4,003	3,016	20,18	28,02	32,00	39,94	16,04
Point triple	Température(k)	néant	14,02	24,5	63,14	54,4	84,0	89
	Pression (hg)		54	324	96	115	516	75
	Pression (bars)		0,07	0,024	0,125	0,0015	0,67	0,098
Point critique	Température(k)	5,2	33,2	44,4	126,1	154,4	130,8	191
	Pression (hg)	2,23	12,8	26,6	33,1	49,5	47,7	45,2
Température d'ébullition à pression atmosphérique(k)		4,2	20,4	27,1	77,3	90,2	87,3	111,7
Volume de gaz provenant d'1 litre de liquide	à T° d'ébullition	7,2	46	121	178	260	240	213
	à T° et P° normales	700	790	1340	646	798	784	595
Chaleur latente à la température d'ébullitions sous pression normale. (kj/kg)		21	452	89,6	199	213	157	577
Chaleur sensible entre la température d'ébullition et 300 k (kj/kg)		1550	3474	280	247	193	112	385
Rapport = $\frac{\text{chaleur sensible } Q_s}{\text{chaleur latente } L}$		74	7,7	3,13	1,24	0,9	0,71	0,67
Capacité frigorifique en (w/l.h)		0,7	9	23	45	68	63	60
Masse volumique à température d'ébullition et pression normale (en 10 ³ kg/m ³)		0,125	0,071	1,21	0,81	1,14	1,40	0,425
Masse volumique à température critique (en 10 ³ kg/m ³)		0,017	0,0015	0,0095	0,0045	0,0044	0,0058	0,0017
Masse volumique à pression et température normales (10 ³ kg/m ³)		0,19	0,009	0,9	1,25	1,40	1,8	0,7
Viscosité du gaz à T d'ébullition (μpoise)		10	10	45	50	70	-	44
Viscosité du gaz à T ambiante (μpoise)		200	90	300	170	20	225	110
Constante diélectrique des liquides		1,049	1,23	1,19	1,43	1,48	152	167

TABLEAU N°1: LES PROPRIETES PHYSIQUES USUELLES DES PRINCIPAUX FLUIDES CRYOGENIQUES... REP [L]

I-2-2 Air liquide:[4]

L'Air est un mélange de gaz, il se liquéfie à une température de 96 K (-177°C), il est transparent, inodore et sans saveur. Il est utilisé comme réfrigérant. Il est parfois utilisé pour l'obtention des basses températures à cause de sa basse température de solidification.

Les composants de l'air sont donnés au tableau N°2.

Gaz	Pourcentage en volume	Gaz	Pourcentage en volume
N2	78,09	He	5,239 10 ⁻⁴
O2	20,94	Kr	1,139 10 ⁻⁴
Ar	0,93	H2	0,5 10 ⁻⁴
CO2	0,033	Xe	0,086 10 ⁻⁴
Ne	18,18 10 ⁻⁴	Rn	6 10 ⁻⁸

Tableau N°2 : composition de l'air atmosphérique.

I-2-3 Oxygène liquide :[4]

La température d'ébullition est de 90 K (-183°C); il est produit en grandes quantités par la liquéfaction et la distillation de l'air à basse température.

Sa manipulation fait appel à des précautions spécifiques à cause de la grande réactivité chimique avec l'hydrogène, et elle est dangereuse du fait qu'il est inflammable, ce qui réduit considérablement son utilisation comme réfrigérant.

Dans l'industrie l'Oxygène liquide tend de plus en plus à

remplacer L'Oxygène comprimé.

I-2-4 Argon liquide : [4]

L'Argon est un gaz inerte, non toxique, incolore et inodore mais il peut agir comme un gaz asphyxiant; sa température d'ébullition est de 84 K (- 189°C). Dans l'industrie, il est utilisé comme un agent protecteur (soudure sous Argon).

I-2-5 Azote liquide : [4]

L'Azote est le composant le plus abondant dans l'air, sa température d'ébullition est de 77 K (-196°C); il est obtenu par distillation de l'air à travers une colonne, il est inactif chimiquement, non toxique et non explosif; c'est un fluide commercialement peu cher.

I-2-6 Hydrogène liquide : [4]

L'Hydrogène existe en deux variétés ortho et para, il est composé de 75% et de 25% respectivement.

La température d'ébullition de l'Hydrogène liquide 20 K (-253°C); la chaleur latente de l'hydrogène liquide est élevée, ce qui demande une bonne isolation thermique des récipients et des lignes de transfert.

Les problèmes rencontrés avec l'Hydrogène sont dus à son extrême réactivité chimique avec l'air et L'oxygène.

I-2-7 Hélium liquide : [4]

L'hélium existe sous deux variétés isotopiques ^3He et ^4He dont, les Propriétés sont notablement différentes.

Son utilisation résulte de sa production artificielle dans les réacteurs nucléaires; il est employé aussi pour réaliser des atmosphères neutres, par exemple dans les traitements thermiques

nécessitant une atmosphère protectrice.

Sa température d'ébullition est de 4,2 k (-269 ° c).
A l'état liquide, l'Hélium est utilisé pour atteindre les très basses températures nécessaires aux études de physique du solide et particulièrement la supra-conductivité.

I-3 Les Propriétés thermiques de l'azote .

Comme tout autre fluide cryogénique, l'azote liquide présente des propriétés physique (tableau N°1) telque les deux points (critique, triple) qui sont d'une importance considérable . L'écart entre ces deux points se situant dans une gamme assez importante, qualifie l'azote liquide à une grande utilisation.

La chaleur de vaporisation H_v (tableau N°3) varie inversement et sensiblement avec la température; à titre indicatif on donne les deux valeurs suivants :

$$H_v (67.9588 \text{ k}) = 5901.6 \text{ j/mole}$$

$$H_v (77.395 \text{ k}) = 5592.2 \text{ j/mole}$$

La conductivité thermique de l'azote liquide est la propriété importante à énoncer. On remarque qu'elle décroît en fonction de l'augmentation de la température (tableau N°6).

La conductivité thermique de l'azote gazeux à la pression atmosphérique est la propriété très intéressante. Elle croît en fonction de l'augmentation de la température (tableau N° 5). On peut utiliser les valeurs de ce tableau pour en déterminer l' expression de la conductivité thermique par interpolation linéaire.

La chaleur spécifique à pression constant C_p varie légèrement avec la température (tableau N°4).

T(K)	Hv (J/g)	T (K)	Hv (J/g)	T (K)	Hv (J/g)
67,958	210,77	78	199,26	100	162,12
67,962	210,69	78,014	198,68	105	150,78
68,000	210,67	78,015	198,89	110	137,04
73,091	204,96	80,0	196,01	115	119,87
73,088	204,71	85,0	188,99	120	95,98
73,10	204,83	90,0	181,08	125	48,92
77,39	199,72	95	172,43	126,1	0

Tableau N°3 "La chaleur latente de l'Azote liquide en fonction de la température [1].

T (K)	Cp (J/g k) P = 1 atm	Cp (J/g k) P = 3 atm	Cp (J/g k) P = 5 atm
100	1,056	1,093	1,140
130	1,045	1,069	1,095
160	1,038	1,053	1,071
190	1,035	1,045	1,055
220	1,033	1,039	1,045
250	1,033	1,038	1,042
280	1,034	1,037	1,041
300	1,035	1,037	1,041

Tableau N° 4 " La variation de chaleur spécifique en fonction de la température [1]

T k	92	100	125	150	172	200	273	300	314
K(w/cm) 10 ⁻⁴	8,69	9,32	12,5	13,7	16,7	18,3	23,8	25,7	27,1

Tableau N°5 "La conductivité thermique de l'Azote gazeux"[1]

T k	68,9	69,9	70,9	73,6	76,3	77,6	78,7	81,7	88,1
$K (W/cmK) \cdot 10^{-4}$	15,2	14,7	15,0	14,4	14,2	13,9	13,8	13,2	12,5

Tableau N°6 "La conductivité thermique de l'Azote liquide"[1]

Enfin, cet exposé se termine par la présentation de quelques valeurs de densité d'Azote liquide (ρ_l en g/Cm³) et d'Azote vapeur (ρ_v en g/Cm³) à saturation (Tableau N°7) et par la remarque faite sur la viscosité d'Azote liquide qui varie inversement avec la température (voir tableau N°8).

T (k)	ρ_l (g/cm ³)	ρ_v (g/cm ³)10 ⁻³
63,15	0.8684	0,672
65	0.8606	0,911
70	0.8401	1,892
75	0.8181	3,532
77,36	0.8073	4,604
80	0.7951	6,070
85	0.7710	9,789
100	0.6896	31,904
120	0.5249	124,444

Tableau N°7 "Variation de densité d'Azote liquide et vapeur"[1]

T(k)	63,9	64,3	64,8	69,1	69,3	71,4	76,1	77,3	111
ν (Poise)	.292	.290	.284	.231	.228	.209	.165	.158	.074

Tableau N° 8 " Variation de la viscosité d'Azote liquide"[1]

I-4 Précaution de manipulation des liquides cryogéniques :

Les manipulations des liquides cryogéniques sont très dangereuses, surtout dans le cas où les règles de sécurité ne sont pas respectées.

- Il est interdit de fumer près des appareils et des réservoirs contenant de l'Oxygène liquide,
- Un liquide cryogénique ne doit pas être stocké dans un récipient qui en contient une certaine quantité d'un autre liquide,
 - Ne jamais remplir un récipient en totalité,
 - Porter lunettes et gants,
- A aucun moment au cours de ces manipulations la tête de l'opérateur ne doit se trouver au dessus du bac contenant le liquide,
 - En cas de brulûres du corps, réchauffer progressivement les parties brûlées et ensuite traiter comme brulûre normale,
- Pour les yeux, appliquer des compresses froides et transporter le blessé auprès du médecin.

CHAPITRE II

**CONCEPTION et REALISATION du
CRYOSTAT**

SOMMAIRE CHAPITRE II

	page
II.1	Introduction 20
II.2	Généralités 20
II.3	Propriétés générales des matériaux à basse température 21
II.3.1	Propriété mécanique 21
II.3.2	Propriété thermique 25
II.3.3	Propriété électrique 27
II.4	Matériaux utilisés en cryogénie 27
II.5	La conception du cryostat..... 29
II.5.1	Selection des matériaux 29
II.5.2	Acier Inoxydable 29
II.5.3	Calcul des enveloppes 31
II.6	La réalisation 34
II.6.1	L'assemblage du cryostat 34
II.6.1.1	Procédés de soudage de l'Acier inoxydable 35
II.6.1.2	Soudure des différents pièces composant le cryostat 36
II.6.2	Vérification primaire de l'étanchéité des cordons de soudure 36
II.6.3	Traitement de surface des tôles et paroi exposées au vide 37
II.6.4	Assemblage des pièces composant le cryostat. 37
II.7	Conclusion 38

Nomenclature

e	épaisseur de l'enveloppe	mm
P	pression de fonctionnement	kg/mm ²
α	coefficient de joint qui dépend du mode de soudure pour des soudures sous Argon	
R	rayon intérieur du cylindre.	mm
σ_{ad}	Contrainte admissible	kg/mm ²
E	le module du Young	kg/mm ²
$E_{0.2}$	la limite élastique	kg/mm ²
Rr	la charge de rupture	kg/mm ²
A%	L'allongement	
Res	La résilience	J/mm ²
K	La conductibilité	W/mmK
Cp	La chaleur spécifique	J/gK

II.1 Introduction .

Le Cryostat que nous réaliserons est une enceinte sous vide à basse température destinée à l'étude de l'influence des vapeurs froides d'Azote sur le refroidissement du Col. Sa construction fait appel principalement à une technologie assez particulière.

Nous aborderons le sujet par l'introduction initiale de généralités concernant la construction d'appareillages cryogéniques, nous exposerons ensuite les caractéristiques des matériaux utilisés en cryogénie et enfin nous terminons par la spécification détaillée de notre cas d'étude réservée à la conception et la réalisation du cryostat.

II.2 Généralités.

La conception d'un appareil cryogénique, pour la production, le stockage, le transport et l'utilisation des gaz liquéfiés doit obéir essentiellement à des critères de choix. On doit éviter la réalisation d'un équipement inutilement coûteux et mal adapté aux besoins. Parmi ces critères de choix essentiels pour la conception, il existe :

a- Température et puissance frigorifique nécessaire.

Elles caractérisent le coût de réalisation et d'exploitation d'un dispositif cryogénique qui augmente avec la diminution de la température pour une certaine puissance frigorifique.

b-La durée d'utilisation et la fiabilité:

L'investissement dans la construction d'un appareil cryogénique fait appel à un choix d'ordre technique et économique. Parmi les exigences techniques, il y a le choix convenable de matériaux de structure adaptés aux problèmes des basses températures. Ces dernières doivent être d'une bonne résistance mécanique et d'une

sécurité totale de leur comportement aux températures d'utilisation cryogéniques. En plus de ces frais, ils viennent ceux de la consommation des fluides, de l'entretien et ceux de la surveillance, ils forment en totalité le coût de l'appareillage.

c-Principe de refroidissement.

IL existe plusieurs procédés de refroidissement dans l'industrie qui représente un choix décisif dans la réalisation des appareils cryogéniques. Parmi eux on cite :

- Immersion d'un corps dans un bain d'azote
- Refroidissement par contact direct ou circulation d'un cryofluide
- L'emploi d'un cryogénérateur (Liquéfacteur).

d-L'accessibilité.

Dans un appareil cryogénique à accessibilité maximale, la réalisation se fait par une conception très coûteuses. Dans ce cas, la précision se porte sur la réalisation des brides qui peuvent se révéler parfois capricieuses à cause de la mauvaise étanchéité, dans l'autre cas, l'appareil est moins onéreux mais le démontage n'est pas possible.

II.3 Propriétés Générales des Matériaux à Basse Température :

II.3.1 Propriétés Mécaniques :

La plupart des matériaux, ductiles à température ordinaire, deviennent fragiles à basse température, un exemple réel de ce cas est la brise des armes allemands devant Moscou au cours de l'hiver 1942-1943, l'explication de ce phénomène est lié directement à la structure cristalline des matériaux.

La structure C.F.C (Cuivre, Nickel, Aluminium et ses alliages, Aciers Inoxydables), possédant les mêmes plans de

glissement en quantités suffisantes, reste ductiles à basse température comme à la température ordinaire.

La structure C.C (Aciers ferritiques ou martensitiques, Molybdène.) subit généralement une transition brutale ductile-fragile à une certaine température où les plans de glissement disparaissent. Cette température peut être supérieure à la température ambiante comme elle peut se situer dans les basses températures. Dans la mesure où l'on vérifie que la température d'utilisation est supérieure à la température de transition, les matériaux de cette structure peuvent être utilisés en cryogénie.

La structure H.C (Zinc, Titane, Magnésium, Béryllium) est généralement fragile dès la température ambiante. Il existe cependant des exceptions (le titane) qui, moyennant quelques précautions (teneur maximale de certaine impureté), restent ductiles à basse température.

Parmi les caractéristiques mécaniques intéressantes à évoquer citant : L'effet de traction à basse température sur les matériaux. On utilise des éprouvettes standards soumises à des essais sur des machines de traction classiques ou particulières, équipées d'un cryostat assurant la basse température fixe .

En général, l'effet des températures cryogéniques sur les caractéristiques mécaniques des matériaux est important :

- La charge de rupture augmente.
- Le module d'élasticité de Young varie peu. (voir fig n°1)
- La limite élastique augmente. (voir fig n°2)

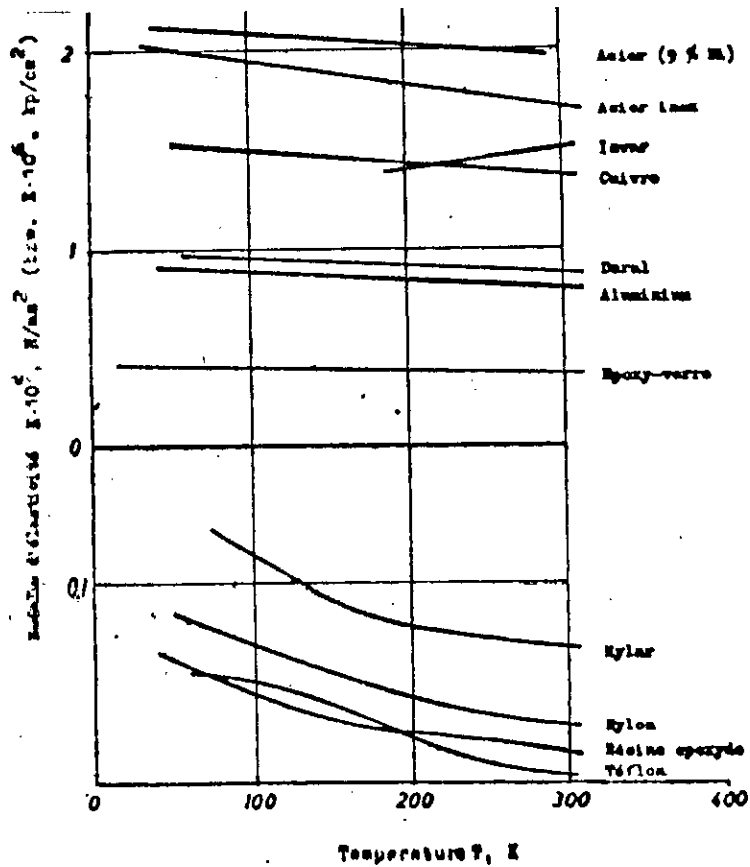


Fig N°1 " Le module de Young de différents matériaux en fonction de la température" [2]

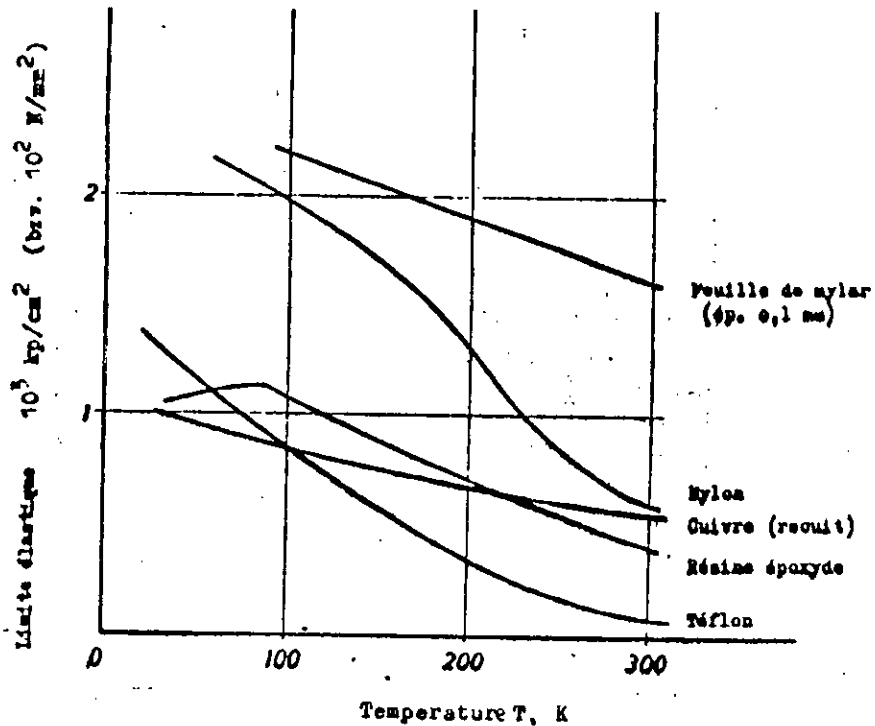


Fig N°2 "La limite élastique de différents matériaux en fonction de la température" [2]

Il existe de nombreuses installations pour l'étude des essais de la résilience sur le comportement des matériaux à basse température, ils ont été conçues sur le même principe des installations de Mouton et Charpy. La seule difficulté rencontrée réside dans le transfert de l'éprouvette du cryostat dans les mors de fixation en un temps suffisamment bref pour éviter au maximum toute élévation de température. Les résultats de ces essais ont démontré l'influence de la structure cristalline sur le comportement fragile ou ductile des matériaux à basse température. Les courbes d'évolution de la résilience en fonction de la température, pour quelques matériaux sont présentées sur (la figure N°3) où l'on distingue clairement sa diminution ou sa conservation en fonction de la température.

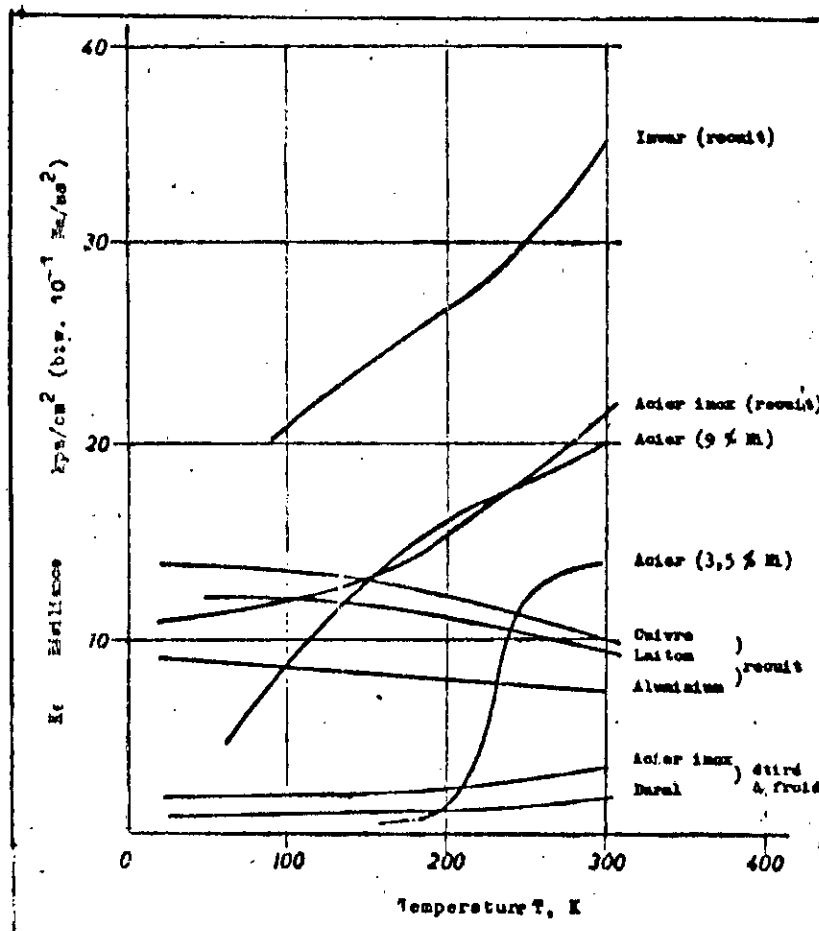


Fig N°3 " La résilience de différents matériaux en fonction de la température" [2]

La fatigue des matériaux caractérise la perte de résistance mécanique, la perte de plasticité et l'augmentation de l'incertitude relative à la durée de vie du matériau en service. La résistance à la fatigue des aciers augmentent quand la température diminue.

II.3.2 Propriétés Thermiques.

1. La conductivité thermique.

Deux tendances fondamentales de la variation de la conductivité thermique vers les basses températures sont présentées (figure N°4), on distingue:

- La conductivité thermique des matériaux purs qui passe par un maximum aux températures cryogéniques. Ce dernier dépend de la nature du matériau, de ces impuretés et son état structurale.
- La plupart des autres matériaux (comme inox, téflon, laiton...) présente une décroissance continue de la conductivité thermique.

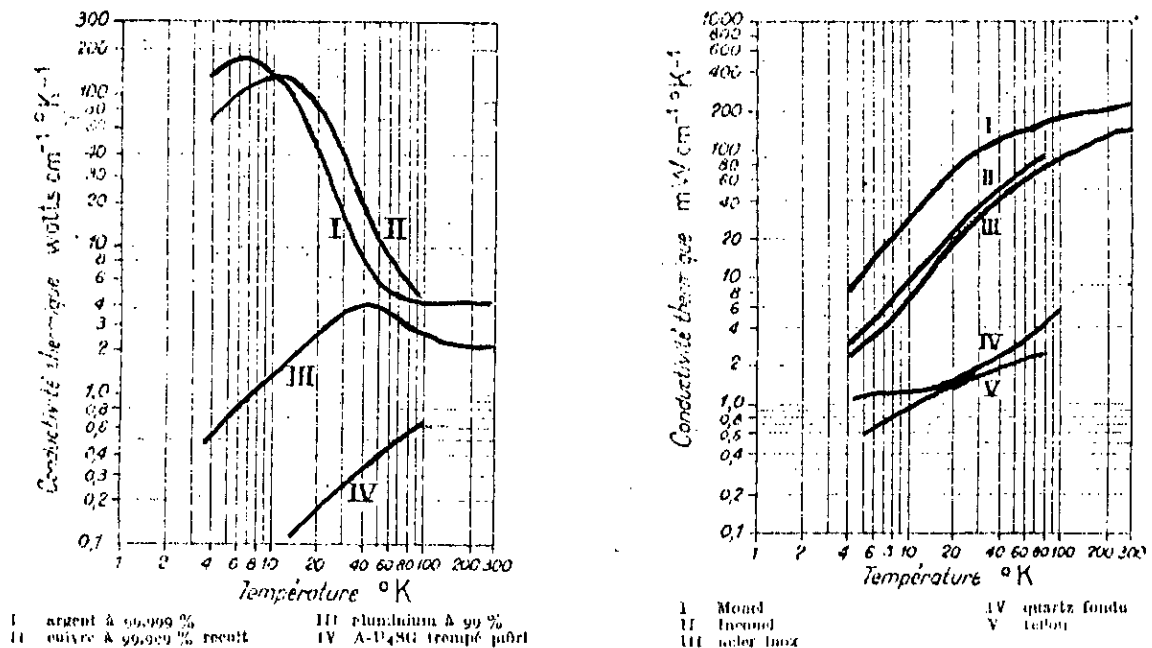
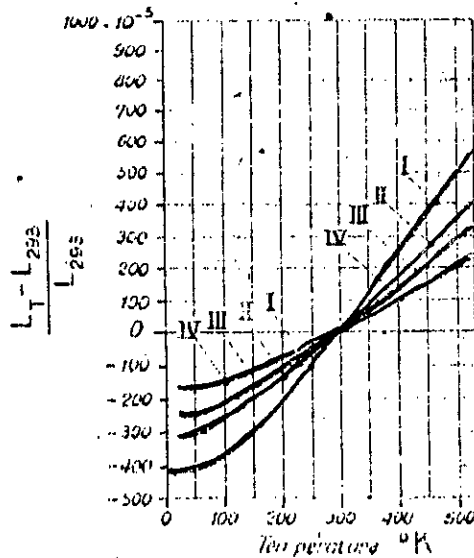


Fig N°4 "La conductivité thermique $K(T)$ pour des matériaux en fonction de la température" [2]

2 Dilatation thermique.

La plupart des matériaux se contractent de 3 à 4 mm par mètre lorsqu'on les refroidit à des températures inférieures à 77 K, en dessous de cette température, la variation devient négligeable (voir figure N°5).



- | | |
|-------------------------------|-------------------------------------|
| I aluminium A-0,251 temps min | IV T-40V recuit à T=251°K |
| II acier inoxydable | III longueur à la température 293°K |
| III Nickel K | IV longueur à 293°K |

Tableau N° 5 : La variation de la dilatation thermique des matériaux en fonction de la température

II.3.3 Propriétés électriques.

Les Propriétés électriques des alliages présentent moins d'intérêt comparé à d'autres applications cryogéniques telles que (la thermométrie, la bobine supraconductrice), la résistivité des alliages est en générale supérieure à celle des constituants pures, elle décroît avec la température et elle tend vers une valeur limite qui est due aux imperfections cristallines et aux impuretés.

II.4 Matériaux Utilisés en Cryogénie.

1- Aciers Ordinaires.

Ils sont utilisés dans les installations cryogéniques comme des parois de renfort, ils sont ferromagnétiques et ils ne peuvent donc être utilisés là où les effets magnétiques posent des problèmes, ils changent facilement de Propriétés par l'effet de traitement thermique. Ils sont facile à souder ou à usiner.

2- Aciers Inoxydables .

Ce sont des alliages fer-carbone-Chrome et Nickel, nous les reverrons avec plus de détails dans les prochains paragraphes.

3- Cuivre .

Il est très ductile et non poreux, il est bon conducteur de chaleur et d'électricité et il résiste fortement à la rupture. Son emploi à basse température est limité aux éléments exigeant une excellente conductivité thermique et électrique (file électrique, écrans d'isolation,...).

4- Aluminium et ses alliages .

Il est ductile, léger, bon conducteur de chaleur et

d'électricité. Il est difficile à braser et présente un problème d'étanchéité dans les soudures réalisées face au vide. La liaison enceinte froide et enceinte chaude n'est jamais possible vu le flux de chaleur qui se manifeste par conduction.

5- Invar.

C'est un alliage à 36% de Nickel dans le fer. Son faible coefficient de dilatation lui autorise son emploi à froid sans éléments de compensation.

6- Verres .

Les verres, mauvais conducteur de chaleur, se brisent lorsqu'on les soumet aux brusques écarts de température. Leur coefficient de dilatation sont très variables. Ils présentent des caractéristiques optiques et diélectriques très importantes.

Les verres utilisés en cryogénie (Silex, Borsilicate, Durax) ont un faible coefficient de dilatation et ils se caractérisent par une excellente résistance thermique.

7- Elastomère et Plastiques .

Ces matériaux se détériorent très vite par l'action du vide, en conséquence, il faut surveiller leur tenue mécanique. Ils présentent un fort coefficient de dégazage. À cause de leur élasticité, ils sont employés comme joints d'étanchéité, membranes ou tubes de liaison souples.

Parmi les Elastomères, on cite : Perbunan, Caoutchouc Silicone, Caoutchouc Butyle, Néoprène; ils sont utilisés pour assurer l'étanchéité des jonctions.

En ce qui concerne les plastiques, on a : Verpel, Téflon, Polyéthylène, Aroldite; ils servent à réaliser des pièces internes d'isolation et des pièces de frottement.

II.5. La conception.

La conception du Cryostat nécessite la connaissance de ses caractéristiques dimensionnelles relatives aux matériaux choisis et de leur fiabilité .

II.5.1 Sélection des matériaux.

Dans toute Sélection de matériaux, réservés à la conception d'un Cryostat, se pose les problèmes suivants :

- les Propriétés mécaniques, physiques et électriques des matériaux,
- La disponibilité du matériau sur le marché,
- La compatibilité de l'équipement réalisé avec le liquide Cryogénique à stocker,
- La fiabilité considérée du Cryostat,
- le prix de revient.

L'Acier Inoxydable sélectionné est l'unique matériau que nous utiliserons dans la réalisation du Cryostat, il est composé de 18% de chrome et de 10% de nickel, sa nuance s'exprime sous la forme:

	Z	3	CN	18	10	
Symbole : fortement allié						10% de NI
Teneur en carbone						18% de Cr
Lettres symbolisant le Chrome & Nickel						

2 Aciers inoxydables .

Les Aciers Inoxydables résistent mieux à l'action du milieu ambiant, c.à.d à la corrosion chimique ou électrochimique. L'amélioration de la tenue à la corrosion s'obtient en ajoutant

à l'acier des éléments qui forment à sa surface des pellicules de protection, empêchant le contact entre le métal et le milieu extérieur.

Ils s'obtiennent essentiellement par l'addition de Chrome, d'Aluminium et de Silicium formant des pellicules protectrices d'oxyde ($(Cr,Fe)_2 O_3$, $(Al,Fe)_2 O_3$). Les aciers à tenue élevée à la corrosion sont rangés principalement en deux classes :

- Aciers au Chrome, titrant entre 12% et 20% de Cr, qui après refroidissement à l'air, ont une structure martensite ou ferritique.

- Aciers au Chrome-Nickel titrant 17 à 18% Cr et 8 à 10% NI, ont après refroidissement lent, une structure austénitique, une résistance modérée, une plasticité élevée et une bonne tenue à la corrosion dans les milieux oxydants.

L'acier austénitique est le plus utilisé en Cryogénie à cause de sa dureté, sa grande ductilité à basse température, sa faible contraction thermique et une bonne soudabilité.

L'acier Z" CN 18-10 a une structure austénitique lui assurant une bonne résistance mécanique, en plus d'une bonne tenue à la corrosion.

Le Cryostat, utilisé à l'air ambiant (300 K), sert à conserver de l'Azote liquide à 77 K, ces deux températures extrêmes peuvent être prises comme références au changement des Propriétés de l'acier. Ces dernières sont indiqués sur le tableau N°2 :

T	E	E _{0,2}	Rr	A%	Res	K	Cp	co-th
77	24600	25	139	35	1.5	0.8	0.159	-210 ⁻³
300	19600	24	55	59	2	1.5	0.470	0

Tableau N°2: Propriétés mécaniques et physiques de l'acier Z3CN 18/10 aux températures à 300 et à 77 k.

Remarque.

- co-th : contraction thermique.
- La contraction différentielle entre les éléments d'un ensemble cryogénique est un problème fréquent qu'il faut résoudre avec soin. La différence entre 300 et 77 k crée une contrainte thermique qu'on peut évaluer à la température moyenne ainsi on a :

$$\text{- Température moyenne : } T_{\text{moy}} = \frac{77 + 300}{2} = 188.5 \text{ k}$$

- Module d'élasticité : $E(188.5 \text{ k}) = 1.75 \cdot 10^5 \text{ kg/mm}^2$
- Contrainte thermique : $S(188.5 \text{ k}) = 1.4 \cdot 10^{-3}$
- Contrainte thermique : $\sigma_{\text{th}} = S E = 245 \text{ kg/mm}^2$

II.5.3 Calcul des enveloppes .

La sécurité maximale dans un réservoir destiné à stocker un gaz sous pression est obtenue par un choix convenable des matériaux (acier inoxydable) . Ce dernier doit présenter une bonne résistance à la propagation brutale des fissures (une bonne ténacité) et une bonne résistance mécanique.

a) Enveloppe soumise à une pression interne .

L'épaisseur e du cryostat intérieur est exprimée par la relation [1]

$$e = \frac{P R}{\sigma_{ad} \alpha - 0,5 P} \tag{I}$$

$$P = 2 \cdot 10^{-2} \text{ kg/mm}^2$$

$$\alpha = 0,8$$

$$R = 75 \text{ mm}$$

$$e = \frac{2 \cdot 10^{-2} \cdot 75}{55/4 \cdot 0,8 - 0,5 \cdot 2 \cdot 10^{-2}} = 0,14$$

On prend e = 1 mm, comme épaisseur de la paroi du cylindre extérieur.

b) Enveloppe soumise à une pression extérieur .

La déduction de l'épaisseur e à partir de l'abaque [1] (figure N°8), donné par le code A.S.M.E, est une opération simple et efficace. Le cylindre soumis à la pression atmosphérique a une longueur L = 565 mm et un diamètre D = 300 mm.

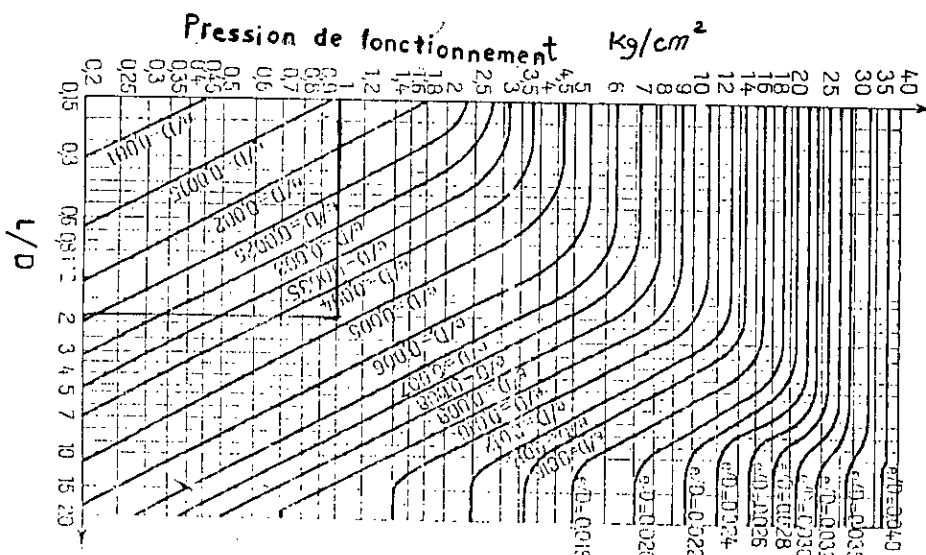


Fig N°8

$$\text{on a : } P = 1 \text{ bar}$$

$$L/D = 565/300 = 1.88$$

$$\frac{e}{D} = 0.0048$$

$$\text{d'où : } e = 1.44$$

L'épaisseur de la paroi du cylindre extérieure est prise égale à une valeur plus grande $e = 2 \text{ mm}$.

c) Calcul des épaisseurs des fonds et couvercles .

Un fond plat circulaire soudé sur son contour est soumis à des contraintes créées par l'action d'une pression P . La contrainte maximale s'écrit [1] :

$$\sigma_{\max} = \frac{3}{16} \frac{PR^2}{e^2}$$

Elle doit vérifier la condition $\sigma_{\max} \leq \sigma_{ad}$, on déduit l'expression de l'épaisseur e :

$$e = 0.866 R \left(\frac{P}{\sigma_{ad}} \right)^{\frac{1}{2}}$$

Cylindre intérieur	Cylindre extérieur
* fond : $P = 2 \cdot 10^{-2} \text{ kg/mm}^2$ $R = 75 \text{ mm}$ $\sigma_{ad} = \text{kg/mm}^2$ $2 \cdot 10^{-2} \cdot 4$ $e = 0.866 \left(\frac{\quad}{55} \right) 75$ - on prend $e = 7 \text{ mm}$ * l'épaisseur du couvercle est de la même dimension	* fond : $P = 10^{-2} \text{ kg/mm}^2$ $R = 150 \text{ mm}$ $\sigma_{ad} = 55/4 \text{ kg/mm}^2$ $10^{-2} \cdot 4$ $e = 0.866 \cdot 150 \left(\frac{\quad}{55} \right)$ - on prend : $e = 7 \text{ mm}$ * l'épaisseur du couvercle est de même

Après le calcul des différentes épaisseurs des cylindres qui constituent le cryostat, nous présentons dans l'annexe (II) tous les dessins de définition.

II.6 Réalisation du cryostat .

Après un travail assez long dans l'atelier du département de Génie Mécanique, nous avons confectionné les différentes pièces constituant notre cryostat par l'exploitation pure des moyens de bord. La gamme d'usinage relative à l'exécution des opérations élémentaires de réalisation de l'enceinte est présentée dans l'annexe (I).

II.6.1 L'assemblage du cryostat .

Au niveau de l'entreprise nationale des gaz industriels E.N.G.I, nous avons trouvé toute l'aide technique nécessaire à la réalisation de la soudure du cryostat par le procédé T.I.G, en plus nous avons fait le vide de l'enceinte grâce à un système de pompage.

II.6.1.1 Procédés de soudage de l'acier inoxydable .

1. Soudage au chalumeau oxyacétylénique .

Il est utilisé sans risque de percer la tôle mince. Si la flamme est oxydante, elle provoque des inclusions gazeuses dans le cordon qui devient poreux.

2. Soudage à l'arc avec électrodes enrobés.

Ce procédé est utilisé à la place du soudage oxyacétylénique pour les tôles ayant une épaisseur supérieure à 1 mm. L'enrobage de l'électrode, évitant le risque d'inclusions gazeuses, est séché avant l'utilisation.

3. Soudage M.I.G (Métal Inert Gaz).

Il convient aux tôles dont l'épaisseur est comprise entre 5 et 25 mm, avec une forte intensité de courant.

4. Soudage T.I.G (Tungstène Inert Gaz).

La source d'énergie de ce procédé est électrique, elle est produite par un poste de soudage permettant de transformer le courant du réseau (tension élevée et intensité faible) en courant de soudage (tension faible intensité élevée) qui produit une grande chaleur entre l'électrode (tungstène) et les pièces à assembler. Le métal d'apport se présente sous forme de fil ou de baguette en inox. Les gaz de protection contre les éléments réactifs de l'atmosphère sont l'Argon ou l'Hélium, ils empêchent l'oxydation.

Ce procédé de soudage s'applique aux tôles d'épaisseur allant de 0.1 à 25 mm.

II.6.1.2 Soudure des différentes pièces composant le cryostat.

La soudure doit assurer la tenue mécanique et garantir l'étanchéité, le procédé T.I.G satisfait ces objectifs parfaitement.

Dans la réalisation de la soudure du cryostat, l'intensité du courant est réglée à une valeur très basse et le débit d'argon est fixé à 6 L/h. Le soudage des fonds avec les cylindres correspondants est opéré en joignant et en fondant les bords des pièces, celle des bords des cylindres (dans la direction longitudinale) est exécuté avec un support gazeux d'azote. Le palier de la bride et son couvercle sont soudés (c'est une soudure d'étanchéité) successivement au cylindre extérieur et intérieur avec un apport de métal. L'assemblage du deuxième palier avec le cylindre intérieur est exécuté intérieurement par la fusion légère des bords des deux pièces.

Enfin, nous terminons par la soudure du tube lié à la vanne du vide sur la bride, nous exécutons ensuite la soudure des différents accessoires adaptés au cryostat: Le tube de remplissage, le tube d'échappement et les anses. Nous signalons que la vanne à vide en bronze est lié au tube en inox par un cordon de soudure en argent réalisé par soudure au chalumeau, cette soudure doit garantir l'étanchéité avec le vide.

La bonne soudure dépend principalement de l'application soignée du soudeur.

II.6.2 Vérification primaire de l'étanchéité des cordons de soudure.

Ce contrôle est appelé la détection des fissures par ressuage. On utilise successivement deux produits: le pénétrant et le révélateur.

On pulvérise le pénétrant (liquide rouge) dans la zone à examiner en couvrant celui-ci en totalité, On laisse imprégner 10 minutes puis on rince abondamment à l'eau en s'aidant d'une éponge. On sèche la pièce et on contrôle après l'application du

révélateur (liquide blanc) en une couche fine et régulière. Si on distingue un trait rouge sur la surface blanche, on conclue qu'il y a fissuration.

II.6.3 Traitement de surface des tôles et parois exposées au vide.

Pour les grandes enceintes sous vide, le traitement des surfaces est indispensable pour éviter la pollution des systèmes de pompage et pour descendre en pression.

- Jusqu'à 0.1 Pa, le nettoyage grossier suffit.
- Jusqu'à 10^{-5} Pa, le nettoyage soigneux minimise les taux de désorption.
- Dans le domaine de l'ultravide, il nécessite un nettoyage soigneux par étuvage à 60 - 70°C.

II.6.4 Assemblage des pièces composant le cryostat.

1. Serrage de la bride.

Dans la gorge du palier du cylindre extérieur, on met une graisse pour vide (silicone) destinée à fixer le joint torique, on place le couvercle sur le palier, on met les vis et on serre les écrous.

2. Mise en place du couvercle.

Un joint en téflon est placé sur le palier pour éviter l'écoulement des vapeurs d'azote, le couvercle placé en dessus est serré avec les six écrous. On indique que les autres trous d'options sont obturés par des bouchons en téflon.

II.7 Conclusion.

Les matériaux de structure, réputés cryogéniques, sont nombreux et permettent de répondre à des besoins très variés. Ce ne sont pas seulement des questions de propriétés mécaniques ou physiques qui peuvent orienter le choix, mais aussi des considérations économiques. Dans la réalisation de structures cryogéniques, les problèmes de prix de revient sont souvent considérés comme impératifs.

Le matériau de réalisation du cryostat est l'acier inoxydable, il a une bonne tenue à la corrosion, une bonne ténacité, une bonne soudabilité et une conductibilité thermique assez faible.

L'usinage de ce matériau, très dur, exige des outils de coupe à pastilles en carbures qui travaillent à faibles vitesses de coupe, à faibles profondeurs de passe et sous une lubrification continue.

Le soudage du cryostat par le procédé T.I.G assure, en plus de la bonne tenue mécanique, une bonne étanchéité face au vide.

Enfin, l'obtention du vide exige des systèmes de pompage assez performants, une pompe Roots en série avec une pompe à 2 palettes et à 2 étages peut atteindre une pression de 1,8 Pa dans le cryostat, la mauvaise étanchéité de la vanne, des cordons de soudure ou du joint torique peut causer la perte du vide.

CHAPITRE III

**ISOLATION THERMIQUE DANS le
CRYOSTAT**

SOMMAIRE DU CHAPITRE III

	page
III.1 Introduction	40
III.2 Différentstypes d'isolation	40
III.2.1 Les mousses	40
III.2.2 Poudres degazées et fibres	41
III.2.3 Isolation sous vide élevé (10^{-4} mbar)	41
III.3 Technique d'obtention du vide	43
III.4 Domaine d'utilisation et le choix des pompes à vide.	45
III.5 Stabilité du vide	45
III.6 Obtention de vide dans le cryostat	46
III.7 Calcul du temps de pompage	47

La nomenclature

Q	Flux de chaleur radiatif	W
σ	Constante de Stefan-Boltzmann	W/cm ² K
ϵ_a	émissivité de la paroi chaude	
ϵ_b	émissivité de la paroi froide	
T _a	Température de la paroi chaude	K
T _b	Température de la paroi froide	K
A	La section transversale	cm ²
n	Nombre d'écrans	.
Q _{ve}	Débit volumique effectif du système de pompage	m ³ /s
V	Volume de l'enceinte	m ³
P	pression dans l'enceinte	Pa
t	temps de pompage	s

III.1 Introduction .

Dans les cryostats l'échange radiatif entre l'enveloppe extérieure et le bain cryogénique, malgré le vide poussé est assez important, l'amélioration par l'interposition, entre les parois des cylindres ~~par~~ des écrans réduits le flux de chaleur transmis par ce seul mode de transfert.

Le choix de l'isolation, qui est déterminant dans la conception des réservoirs cryogéniques, dépend essentiellement des considérations économiques (la valeur admissible pour les pertes par évaporation, le prix de l'isolation), et des critères dimensionnelles (le poids de l'isolation, son encombrement).

Nous présentons rapidement les différents types d'isolation, puis nous nous intéressons à la réalisation du vide dans notre cryostat.

III.2 Différents types d'isolation .

1. Les mousses.

Ces matériaux sont présentés sous forme de plaques rigides ou souples d'origine:

- Végétale comme le liège
- Minérale comme le verre mousse
- Synthétique comme les mousses polystyrène

Ils ont un coût peu élevé, leur mise en oeuvre et leur entretien s'imposent très facile. En parallèle, ils présentent une conductibilité thermique voisine en moyenne à celle de l'air (environ $5 \cdot 10^{-4}$ w/cm.k) qui augmente sensiblement dans le temps, mais aussi peut être diminuée en abaissant la pression (opération très difficile) dans l'espace inter-paroi où elle se trouve. La contraction de ces isolants est trois fois plus grande que celle

des métaux, et lors de la présence d'oxygène, il peut y avoir risque d'explosion. En plus, les entrées des vapeurs d'eau à basse température peuvent désagréger l'isolation.

2. Poudres degazées et fibres :

Ces matériaux sont des particules minérales très fines, de taille allant de 100 à 200 microns. Parmi ces isolants, on cite: le gel de silice, l'alumine activée, les microbilles de verre et la perlite. Combinées avec le vide d'ordre 10^{-3} torr, ils assument une performance thermique intéressante; la conductibilité thermique moyenne \bar{K} passe à une valeur d'ordre $5 \cdot 10^{-5}$ W/cm.K. L'absorption d'une faible quantité d'eau peut faire augmenter K de 7%, il faut dans ce cas stocker les matériaux à l'abri de l'humidité et les dégazer à chaud avant leur emploi. En cas de rupture de vide, l'enveloppe extérieure ne givre pas. Les poudres présentent un caractère plus rustique que les mousses.

3. Isolation sous vide élevé (10^{-4} mbar) :

Dans ce cas, l'amélioration de l'isolation passe principalement par la minimisation du seul flux de chaleur rayonné entre la paroi chaude et la paroi froide. Par un choix approprié du matériau (acier inox argenté est meilleur que l'acier chromé) et un traitement de surface adéquat (polissage soigné).

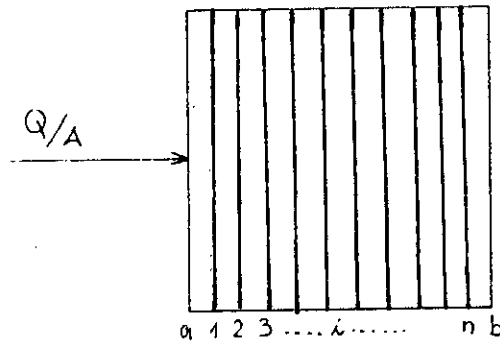
Ce flux sera moins intense grâce au faible pouvoir émissif des parois représenté par l'émissivité ϵ réduite. La valeur de l'émissivité peut augmenter dans le temps selon le matériau et un dépôt par condensation sur la surface froide peut notablement l'altérer.

La technique de l'écran intermédiaire refroidi à la température moyenne s'impose pour les réservoirs d'LH₂ et d'LH_e puisque pour un même pouvoir émissif, le flux émis par une surface à 300 k vers une surface à 4 k est 20 fois plus grand que celui d'une surface à 80 k.

La superisolation consiste en l'interposition de n écrans passifs (pas de refroidissement intermédiaire) entre la paroi chaude et la paroi froide. Ces derniers réduisent le flux de chaleur à $1/n+1$ de sa valeur initiale. On considère deux parois, l'une chaude à la température T_a et l'autre froide à la température T_b . Le flux de chaleur échangé entre ces deux surfaces ayant la même émissivité est:

$$\frac{Q}{A} = \frac{\sigma(T_a^4 - T_b^4)}{\left(\frac{1}{\epsilon_a} + \frac{1}{\epsilon_b} - 1\right)} = \frac{\sigma(T_a^4 - T_b^4)}{\left(\frac{2}{\epsilon} - 1\right)} \quad (1)$$

Dans le cas où l'on interpose n écrans (voir fig N°1), et dans les conditions d'un régime permanent:



$$\frac{Q}{A} = \frac{\sigma(T_a^4 - T_1^4)}{\left(\frac{1}{\epsilon_a} + \frac{1}{\epsilon_1} - 1\right)} = \frac{\sigma(T_1^4 - T_2^4)}{\left(\frac{1}{\epsilon_1} + \frac{1}{\epsilon_2} - 1\right)} = \dots = \frac{\sigma(T_i^4 - T_{i+1}^4)}{\left(\frac{1}{\epsilon_i} + \frac{1}{\epsilon_{i+1}} - 1\right)} = \dots$$

$$\frac{Q}{A} = \frac{\sigma(T_a^4 - T_b^4)}{\left(\frac{1}{\epsilon_a} + \frac{1}{\epsilon_b} - 1\right)} = \frac{\sigma(T_a^4 - T_b^4)}{\left(\frac{1}{\epsilon_a} + \frac{1}{\epsilon_b} - 1\right) + \sum_{i=1}^n \left(\frac{1}{\epsilon_i} + \frac{1}{\epsilon_i} - 1\right) + \left(\frac{1}{\epsilon_n} + \frac{1}{\epsilon_b} - 1\right)} \quad (2)$$

Les écrans passifs sont constitués par des feuilles réfléchissantes d'Aluminium, séparées par des feuilles isolantes (linde) ou

$$e_a = e_1 = \dots e_i = \dots = e_n = e_b = e$$

$\frac{Q'}{A}$ peut s'écrire sous la forme :

$$\frac{Q'}{A} = \frac{1}{n+1} Q/A$$

bien par une seule feuille isolante d'un côté et réfléchissante de l'autre (Mylar Aluminisé), la mise en oeuvre de ces isolants nécessite un vide inter-couches inférieur à 10^{-4} torr assuré par l'incorporation dans le matériau espaceur d'absorbants.

Une isolation plus performante, réservée aux réservoirs d'LHe d'une contenance de quelques dizaines à plusieurs milliers de litres, est assurée par la mixité entre les deux dernières isolations. Son établissement relève d'une ambiance de mystère et secret chez les fabricants.

III.3 Techniques d'obtention du vide:

Le vide est le domaine des installations où la pression est inférieure à la pression atmosphérique. Le vide complètement dépourvu de matière (vide absolu) est théorique, car déjà en laboratoire, on arrive difficilement à une pression de 10^{-12} pa on distingue :

- Domaine du vide grossier de 10^5 à 10^2 Pa; écoulement visqueux;
- Domaine du vide moyen de 10^2 à 10^{-1} Pa; écoulement transitoire;
- Domaine du vide poussé de 10^{-1} à 10^{-5} ; écoulement moléculaire;
- Domaine de l'ultravide inférieur à 10^{-5} Pa.

Les pompes à vide capable d'abaisser la pression, aspirent un certain flux de l'enceinte, le comprime et le refoulent à une pression supérieure à la pression d'aspiration, ce sont des pompes d'extraction primaires (lorsque la pression de refoulement est égale à la pression atmosphérique) ou secondaires (lorsque la pression de refoulement est inférieure à la pression atmosphérique), qui fonctionnent en compression par réduction de volume ou

en compression par entraînement moléculaire ou visqueux. On cite
Parmi ces pompes:

A/ Pompe volumétrique:

1-Pompe à une seule palette:

Domaine d'utilisation:

- Pression pour un étage : 10^5 à $6 \cdot 10^{-1}$ Pa
- Pression pour deux étages : 10^5 à $5 \cdot 10^{-2}$ Pa
- débit volumique : 0,5 à 70 dm³/s

2-pompes multi-palettes:

Domaine d'utilisation :

- Pression : 10^5 à 200 Pa
- Débit volumique : 2,5 à 170 dm³/s

3-Pompe à anneau liquide:

Domaine d'utilisation :

- Pression : 10^5 à $4 \cdot 10^4$ Pa.
- Débit volumique : 3 à 3000 dm³/s

4-Pompe Roots:

Domaine d'utilisation :

- Pression en pompage primaire: 10^5 à $4 \cdot 10^4$ Pa
- Pression en pompage secondaire: 10^4 à 10^{-2} Pa
- Débit volumique : 10^2 à $3 \cdot 10^4$ dm³/s.

B/Pompe à entraînement :**1/ Pompe turbomoléculaire (P.T.M) :**

Domaine d'utilisation :

- Pression : 10^{-1} à 10^{-10} Pa
- Débit volumique : 10^2 à 3.10^3 dm³/s

2/Pompe à jet de vapeur (pompe à diffusion):

Domaine d'utilisation :

- Pression : 10^{-1} à 10^{-10} Pa
- Débit volumique : 10^2 à 3.10^3 dm³/s.

Il existe aussi les pompes de fixation (primaires ou secondaires) qui n'extraient pas le gaz de l'enceinte mais fixent ses molécules par sorption ou condensation sur la surface piégeante à faible émission. On cite Parmi ces pompes:

Les pompes à sorption, les pompes à sublimation de titane, les pompes ioniques et les pompes cryogéniques.

III.4 Domaine d'utilisation et le choix des pompes à vide:

La pression d'utilisation et le débit volumique recherché sont les principaux facteurs de choix d'un système de pompage.

Le nombre de machines à placer en série n'est pas précis.

III.5 Stabilité du vide:

L'instabilité du vide provient du dégazage des matériaux constituant le cryostat. Les moyens efficaces pour assurer la stabilité est l'adsorption des ces gaz par des adsorbants physiques (charbon actif et zéolithe) ou chimique (les getters).

Les charbons actifs plus performants que les zéolithes, adsorbent peu d'Hydrogène, peu de néon et peu d'Hélium dans des conteneurs d'azote pour conserver le vide d'isolation.

En dessous de cette température, le zéolithe adsorbe l'Hydrogène en grand quantité, le charbon actif par ailleurs reprend ses bonnes qualités d'adsorption à 40 K. Il faut remarquer qu'une quantité assez importante de charbon actif ($12 \cdot 10^4$ g) sert à éliminer l'Hydrogène, il est normal de placer des getters.

En conclusion, la stabilité du vide dans le cryostat d'azote liquide dépend essentiellement de la mise en place de getters et de charbons actifs complémentaires.

III.6 Obtention de vide dans le cryostat:

Le vide dans le cryostat est réalisé grâce à un système de pompage formé d'une pompe Roots placée en série avec une pompe à quatre palettes.

Le système est lié à une vanne de vide par l'intermédiaire d'un flexible centré et serré à ses extrémités successivement par une bague de serrage. Dans ce système de pompage, un filtre purifie l'air et un piège d'azote lui enlève l'humidité, la pression dans l'enceinte de vide (calculée par un manomètre raccordé au système de pompage) descend jusqu'au domaine du vide moyen. Elle est égale à la limite de pompage du système, soit 1.8 Pa.

La conservation de l'isolation de ce niveau de pompage dépend essentiellement de l'étanchéité de l'enceinte. On contrôle la fuite par la mise sous pression de l'enceinte par l'azote gazeux à 2 bar, la mousse de savon est déposée sur les cordons de soudure, le contour extérieur de la bride et sur les endroits de possibilité de fuites dans la vanne. Elle détecte assez bien la mauvaise étanchéité. Heureusement, on a l'étanchéité totale dans la chambre sous vide.

Un deuxième pompage, après 24 heures on vérifie le niveau du

vide. Si après la pression baisse, le résultat est clair, il existe des micro-fissures dans l'enceinte qui seront détectées par le détecteur à hélium. Il est inutile d'exécuter l'opération puisque le vide dans le cryostat est stable.

III.7 Calcul du temps de pompage:

Quand le flux de désorption est négligeable (domaine du vide grossier 10^5 à 10^2 Pa) et en l'absence de fuite de perméation, la variation de la quantité de gaz présente dans l'enceinte du cryostat est égale au flux pompé $q_{ve} P$:

$$V \frac{dP}{dt} = -q_{ve} P$$

V : volume de l'enceinte [m^3],

q_{ve} : débit volumique effectif du système de pompage à la pression P [m^3/s],

P : pression dans l'enceinte [Pa].

$$dt = -\frac{V}{q_{ve}} \frac{dP}{P}$$

Une première intégration donne le temps de pompage correspondant à la chute de pression de 10^5 à 1.8 Pa.

CHAPITRE IV




**ETUDE de L'ECHANGE THERMIQUE
PARFAIT DANS le CRYOSTAT**

SOMMAIRE CHAPITRE IV

	page
IV.1	Etude théorique 50
IV.1.1	Introduction 50
IV.1.2	Echange thermique dans le col d'un cryostat..... 50
IV.1.3	Echange thermique parfait sans rayonnement au col 51
IV.1.3.1	Bilan énergétique 51
IV.1.3.2	Evaluation des différents flux de chaleur provoquant l'évaporation de l'azote liquide 57
IV.1.3.2.1	Calcul du flux chaleur conductif Q_1 dans le cas où le col est sans ventilation..... 57
IV.1.3.2.2	Flux de chaleur par rayonnement..... 57
IV.1.3.2.3	Flux de chaleur conductif à travers les vapeurs d'azote..... 60
IV.1.3.2.2	Flux de chaleur conductif dans le vide résiduel..... 61
IV.1.4	Echange thermique parfait avec rayonnement au col..... 63
IV.1.4.1	Bilan énergétique 63
IV.1.5	Resultats théoriques..... 66
IV.3	Conclusion..... 72

Tableau N°1 Les différentes expressions de la conductibilité thermique.....	54
Tableau N°2 Les différentes entrées de chaleur dans le cryostat.....	63
Tableau N°3 Resultats comparatifs entre les deux cas d'échange parfait.....	68
Tableau N°4 Resultat de l'essai du cryostat.....	70

Nomenclature

T	 température	k
L	Longueur du col	cm
A	section du cylindre intérieur	cm ²
Lp	libre parcours moyen	cm
μ	viscosité du gaz	poises
P	pression	micro Hg
M	Poids moléculaire	g/mole
Q _i	Flux conductif cédé au bain d'azote	W
Q _x	Flux conductif à la distance x du col	W
Q _{iev}	Flux de chaleur par conduction dans le col sans ventilation.	W
Q _r	Flux de chaleur par rayonnement dans le vide entre les parois chaude  et froide.	W
Q _{rc}	Flux de chaleur par rayonnement entre le couvercle et le bain d'Azote.	W
Q _{ev}	Flux de chaleur conductif dans le vide résiduel	W
ϕ	Rapport des flux de chaleur	
h	Descente en hauteur du liquide cryogénique	mm
t	 temps d'évaporation	s

V 1 Etude théorique .

IV.1.1 Introduction.

Dans ce chapitre, nous étudierons les pertes thermiques globales couplés existant dans un cryostat. A cause de ce couplage thermique (conduction-rayonnement), la modélisation mathématique du problème complet n'est pas possible. Aussi, dans notre approche théorique nous adoptons un modèle simplifié, en particulier un échange thermique parfait entre les parois du col et les gaz ventilés. Cette approche donne de bon résultats avec l'expérimentation (Wexler [1]) pour des pertes thermiques modérées.

IV.1.2 Echange thermique dans le col d'un cryostat .

Dans l'étude thermique d'un cryostat, nous avons trois modes d'échanges, à savoir : conduction, convection et rayonnement qui interviennent dans l'estimation du taux d'évaporation du fluide cryogénique.

A/ Le rayonnement.

Nous avons le rayonnement à travers le vide, entre la paroi chaude du cylindre extérieur et la paroi froide du cylindre intérieur d'une part, d'autre part à travers les vapeurs froides entre le bain cryogénique et le couvercle.

B/ La conduction : (classique, gaz, moléculaire).

Dans la conduction, nous avons :

- La conduction axiale à travers les parois du col.
- La conduction axiale à travers les vapeurs d'azote.
- La conduction dans le vide résiduel.

C/ La Convection : (échange parfait, échange imparfait) .

Le problème le plus délicat est l'échange thermique entre les parois du col et les vapeurs ventilées. Il est clair que nous avons une convection naturelle due au fait que la vitesse d'entrée juste au dessus du bain cryogénique est très faible comparativement avec la vitesse maximum de la couche limite [6]. En plus nous avons un gaz stratifié, c'est à dire les couches de gaz évaporé sont plus lourdes dans le sens inverse de l'écoulement. Cette stratification est défavorable à la convection naturelle, ce qui explique que la température du fluide ventilé est très proche de celle de la paroi en chaque position du col. Par conséquent, le modèle d'échange thermique parfait (température de la paroi égale à la température des gaz) peut remplacer le modèle à couche limite surtout pour des taux d'évaporation peu élevés. C'est cette approche que nous avons adoptée dans cette étude .

IV.1.3 Échange thermique parfait dans un col isolé latéralement:

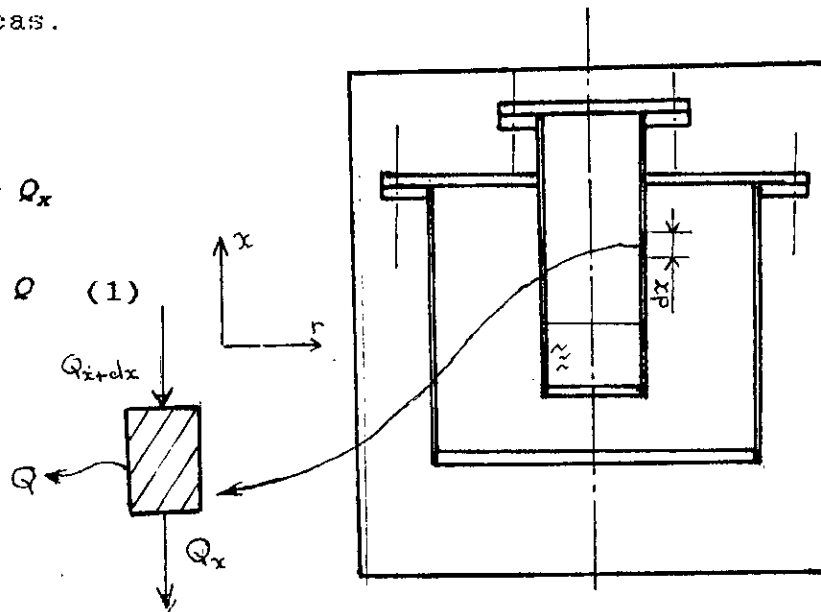
IV.1.3.1 bilan énergétique:

Si on isole un élément de volume du col sous forme d'un petit anneau d'épaisseur dx (voir fig N°1) où l'on applique un bilan énergétique, on peut déterminer l'équation différentielle propre à ce cas.

On a :

$$Q_{x+dx} = Q + Q_x$$

$$\frac{\partial Q_x}{\partial x} dx = Q \quad (1)$$



L'augmentation d'enthalpie dans les vapeurs d'azote, s'écoulant en régime permanent avec un débit \dot{m} stabilisé à travers le volume de contrôle V_c , est le résultat du flux de chaleur Q cédé par la paroi. On a :

$$dH = Q$$

On suppose que l'azote est un gaz parfait

$$dH = \dot{m} c_p dT = Q \quad (2)$$

$C_p(T)$ varie peu avec la température.

En combinant les équations (1) et (2) on obtient :

$$\frac{\partial Q_x}{\partial x} dx = \dot{m} c_p dT \quad (3)$$

$$\begin{cases} T = T(x) \\ Q_x = Q_x(x) = K(x) A \frac{dT}{dx} \end{cases} \quad (4)$$

L'équation (3) devient :

$$dQ_x = \dot{m} c_p dT$$

une simple intégration donne :

$$\int_{Q_1}^{Q_x} dQ_x' = \dot{m} \text{ cp} \int_{T_1}^{T(x)} dT \quad (5)$$

$$Q_x - Q_1 = \dot{m} \text{ cp} (T(x) - T_1)$$

soit :

$$K(T) A \frac{dT}{dx} = \dot{m} \text{ cp} (T(x) - T_1) + Q_1 \quad (6)$$

C'est une équation différentielle non linéaire $(K(T) \frac{dT}{dx})$

qui pose un problème aux limites :

$$x = 0 \quad , \quad T(x=0) = T_1 = 77 \text{ K} .$$

$$x = 1 \quad , \quad T(x=1) = T_f = 273 \text{ K} .$$

Nous procédons à la résolution par la détermination initiale du flux de chaleur Q_1 .

$$A K(T) \frac{dT}{dx} = \dot{m} \text{ cp} (T(x) - T_1) + Q_1$$

$$\frac{A}{\dot{m} \text{ cp}} K(T) \frac{dT}{dx} = T - T_1 + \frac{Q_1}{\dot{m} \text{ cp}} \quad (7)$$

La détermination de Q_1 dépend de l'expression de la conductivité thermique $K(T)$ qui est déduite, dans des domaines renfermées entre 77 et 300 k, par une simple interpolation linéaire entre 2 points successifs, représentant la conductivité thermique à la température correspondante.

Si on prend les 2 premiers points:

76 k ————— 0.080 w/cm.k

$$K(T) = (7,5 T + 230) 10^{-4} \text{ w/cm k}$$

80 k ————— 0.083 w/cm.k

Les résultats d'interpolation pour les autres points restants, combinés deux à deux, peuvent être groupés dans le tableau N°2 REF [1].

T [K]	conductibilité thermique locale [W/cm.k]	expression de $K(T_i)$ dans le domaine $[T_i, T_{i+1}] 10^{-4}$
76 80	0.080 0.083	$K_1(T) = (7.5T + 230)$
80 90	0.083 0.090	$K_2(T) = (7T + 270)$
90 100	0.090 0.095	$k_3(T) = (5T + 450)$
100 120	0.095 0.103	$K_4(T) = (4T + 550)$
120 140	0.103 0.110	$k_5(T) = (3.5T + 610)$
140 160	0.110 0.120	$k_6(T) = (5T + 400)$
160 180	0.120 0.123	$k_7(T) = (1.5T + 960)$
180 200	0.123 0.130	$k_8(T) = (3.5T + 600)$
200 250	0.130 0.140	$k_9(T) = (2T + 900)$
250	0.140	$k_{10}(T) = (2T + 900)$

Tableau N°1 Les différentes expressions de la conductibilité thermique. [1]

L'expression de la conductivité thermique s'écrit sous la forme générale :

$$K(T_i) = a_i T + b_i \quad \text{w/cm.k}$$

Une simple intégration sur toute la longueur du col donne :

$$L = \frac{A}{\dot{m} \text{ cp}} \int_{T_1}^{T_2} \frac{K(T)}{T+\alpha} dT$$

si on partage l'intervalle $[T_1, T_2]$ en N nouveaux intervalles $[T_1, T_2], [T_2, T_3], \dots, [T_n, T_{n+1}]$, (avec $T_2=T_{n+1}$) l'intégrale précédente devient :

$$L = \frac{A}{\dot{m} \text{ cp}} \sum_{i=1}^n \int_{T_i}^{T_{i+1}} \frac{K_i(T_i)}{T_i + \alpha} dT$$

$$\text{mais : } K_i = a_i T + b_i$$

d'où :

$$L = \frac{A}{\dot{m} \text{ cp}} \sum_{i=1}^n \int_{T_i}^{T_{i+1}} \frac{a_i T + b_i}{T + \alpha} dT$$

$$L = \frac{A}{\dot{m} \text{ cp}} \sum_{i=1}^n \left[a_i (T_{i+1} - T_i) + (b_i - \alpha a_i) \ln \left(\frac{T_{i+1} + \alpha}{T_i + \alpha} \right) \right]$$

$$\text{mais : } \dot{m} = \beta (Q_1 + Q_r + Q_c + Q_{cv} + Q_{rc}) \quad (\text{voir annexe III.1})$$

$$\text{si on pose : } \phi = \frac{Q_1}{Q_1 + Q_r + Q_c + Q_{cv} + Q_{rc}}$$

$$\text{on a : } \dot{m} = \frac{\beta}{\phi} Q_1$$

$$\text{et : } \alpha = \frac{\phi}{\beta \text{ cp}} - T_1$$

Ainsi, l'expression du flux de chaleur Q_1 peut s'écrire, en fonction du facteur géométrique Z et du rapport des flux de chaleur ϕ , sous la forme suivante:

$$Q_1 = \frac{Z \Phi}{\beta cp} \sum_{i=1}^n (a_i (T_{i+1} - T_i) + [b_i - (\frac{\Phi}{\beta cp} - T_1) a_i]) \ln \left(\frac{T_{i+1} - T_1 + \frac{\Phi}{\beta cp}}{T_i - T_1 + \frac{\Phi}{\beta cp}} \right)$$

On détermine aussi :

$$Q_r = \left(\frac{1}{\phi} - 1 \right) Q_1$$

$$\dot{m} = \beta (Q_1 + Q_r + Q_c + Q_{cv} + Q_{ic})$$

La détermination de la distribution de température, identique à celle des vapeurs d'azote le long de la paroi du col, est astucieusement évitée en évaluant simplement la distribution des distances en fonction de la température.

Si on intègre l'équation différentielle précédente sur une longueur x du col on aura:

$$\frac{A}{\dot{m} cp} \int_{T_1}^T \frac{k(T')}{T' + \alpha} dT' = \int_0^x dx' = x(T)$$

pour $T = T_1$

$$x(T_i) = \frac{A}{\dot{m} cp} \sum_{j=1}^i a_j (T_{j+1} - T_j) + [b_j - a_j \left(\frac{Q_1}{\dot{m} cp} - T_1 \right)] \ln \left(\frac{T_{j+1} - T_1 + \frac{Q_1}{\dot{m} cp}}{T_j - T_1 + \frac{Q_1}{\dot{m} cp}} \right)$$

IV.1.3.2 Evaluation des différents flux de chaleur provoquant l'évaporation de l'azote liquide:

- 1) Calcul du flux de chaleur conductif Q_1 dans le cas où le col est sans ventilation :

Dans ce cas, les vapeurs d'azote ne refroidissent pas le col du cryostat. Nous supposons que la distribution de température sur le col est linéaire entre 77 et 300 k (figure N°2)

$$T(x) = 7.43 x + 77 \quad [k]$$

Ce flux de chaleur conductif Q_1 reçu par le bain d'azote au bas du col est obtenue par:

$$Q_1 = A K(T_1) \left. \frac{dT}{dx} \right|_{x=0}$$

$$Q_1 = 5.59 \quad (W)$$

- 2) Flux de chaleur par rayonnement:

Le calcul du flux de chaleur par rayonnement implique l'utilisation du facteur de forme, difficile à déterminer à cause de la complexité du calcul de son intégrale d'ordre 4 relative aux différentes surfaces du cryostat, en outre, la variation de la température sur le col pose le problème de la variation de l'émissivité. Ainsi, il est obligatoire de passer par des hypothèses simplificatrices telles que le rayonnement entre deux surfaces uniques. (annexe III.2)

Une indication de différents flux de chaleur, rayonnés entre les surfaces correspondantes du cryostat est précisée sur la figure N° 2, leur estimation approchée est déterminée par la suite.

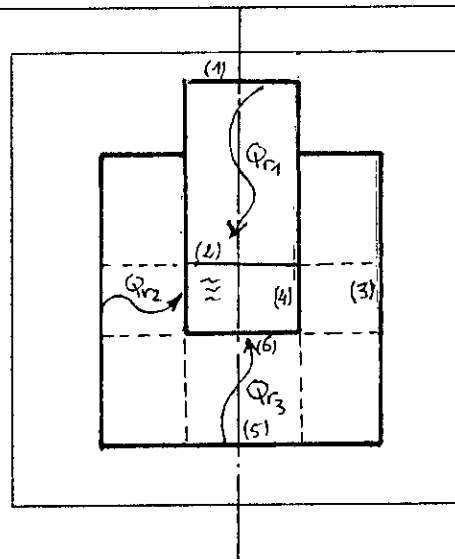


Figure N°2

2.a) Flux de chaleur rayonné entre la surface chaude 1 et la surface froide 2 :

Hypothèse :

Le flux de chaleur Q_{r1} rayonné par la surface 1 est intercepté intégralement par la surface noire 2. Les vapeurs d'azotes sont considérées dans ce cas comme un corps transparent. On peut écrire :

$$Q_{r1} = \epsilon_1 A_1 \sigma (T_1^4 - T_2^4)$$

A.N $\epsilon_1 = \epsilon(300) = 0.7$

$T_1 = 300 \text{ k}$

$T_2 = 77 \text{ k}$

$\sigma = 5.67 \cdot 10^{-12} \text{ W/cm}^2 \text{ k}^4$

$A_1 = 172.034 \text{ cm}^2$

$Q_{r1} = 5.51 \text{ (w)}$

2.b) flux de chaleur rayonné entre la surface chaude 3 et la surface froide 4 :

Hypothèse :

Le flux de chaleur rayonné par la surface 3 est intégralement intercepté par la surface 4, l'échange de chaleur est entre deux surfaces grises séparées par un milieu transparent avec un facteur de forme F_{12} égale à l'unité. Ce cas se rapporte à celui du rayonnement de 2 cylindres co-axiaux de longueur très grande devant le diamètre. Si la réflexion est spéculaire (cas où les surfaces polies sont très proches), le rapport de surface est égale à 1 .

on peut écrire :

$$F_{34} = \frac{\epsilon_3 \epsilon_4}{\epsilon_4 + \frac{A_3}{A_4} (1 - \epsilon_4) \epsilon_3}$$

et : $Q_{r2} = F_{34} A_3 \sigma (T_3^4 - T_4^4)$

A.N : $T_3 = 288 \text{ k}$ $\epsilon_3 = \epsilon(288) = 0.65$ $F_{34} = 0.106$
 $T_4 = 77 \text{ k}$ $\epsilon_4 = \epsilon(77) = 0.2$ $\sigma = 1115.89 \text{ cm}^2$

$$Q_{r2} = 4.59 \text{ W}$$

2.c) Flux de chaleur rayonné entre la surface chaude 5 et la surface froide 6 :

Sous les mêmes hypothèses que précédemment, on peut écrire :

$$Q_{r3} = F_{56} A_5 \sigma (T_5^4 - T_6^4)$$

A.N $T_5 = 288 \text{ k}$ $A_5 = 176.71 \text{ cm}^2$

$$T_s = 77 \text{ k}$$

$$F_{se} = 0.18$$

$$Q_{ra} = 1.23 \text{ W}$$

3) Flux de chaleur conductif à travers les vapeurs d'azote:

L'expression du flux de chaleur conductif arrivant sur le bain d'azote s'écrit sous la forme suivante :

$$Q_c = K_f(T) A \left. \frac{dT}{dx} \right|_{x=0}$$

L'axe des x est dirigé vers le haut, A est la section de la colonne de vapeurs.

Nous ne connaissons pas la distribution de température $T(x)$ dans la colonne de vapeur, mais nous savons qu'elle varie, dans le col, entre 77 et 273 k. L'expression de la conductivité thermique est donnée par une interpolation de Lagrange pour trois points (voir tableau de la conductivité thermique de l'Azote gazeux sous une Atmosphère [1])

$$\bar{K} = \int_{77}^{273} \frac{K(T) dT}{\Delta T}$$

$$K_f = (-0.35 \cdot 10^{-4} T^2 + 0.096 T + 0.177) \cdot 10^{-5} \text{ w/cm k}$$

$$K = 15.79 \cdot 10^{-5} \text{ W/cm k}$$

Ainsi on peut calculer le flux de chaleur Q_c comme suit :

$$Q_c = K A \frac{\Delta T}{L}$$

A.N :

$$A = 172.03 \text{ cm}^2$$

$$L = 42.5 \text{ cm}^2$$

$$Q_c = 0.125 \text{ W}$$

4) Flux de chaleur conductif à travers le vide résiduel .

Dans les gaz, il peut exister un mode de transfert thermique appelé : la conduction dans le vide résiduel caractérisé par le libre parcours moyen L_p . Si d est la distance qui sépare les deux parois aux températures T_1 et T_2 , on peut écrire :

- $L_p \ll d$: on a une conduction classique,
- $L_p \gg d$: on a une conduction moléculaire où le transfert se fait par choc des molécules d'une paroi à l'autre.
- $L_p = d$: on a une région transitoire.

Le libre parcours moyen des molécules est donné par la relation [1]

$$L_p = 8,6 \cdot 10^3 \frac{\mu}{P} \sqrt{\frac{T}{M}}$$

Dans notre cas, nous supposons que la conduction dans l'air est limitée successivement par les surfaces A_3 , A_4 et les surfaces A_5 , A_6 .

A.N :

- $T = T_M = 188.5 \text{ K}$
- $\mu = \mu(188,5) = 12,71 \cdot 10^{-5} \text{ poise}$
- $P = 4 \text{ Pa} = 30.4 \cdot 10^{-3} \text{ mm Hg}$
- $M = 29 \text{ g/mole}$

$$L_p = 8.6 \cdot 10^3 \frac{12.71 \cdot 10^{-5}}{30.40} \sqrt{\frac{188.5}{29}} = 0.09 \text{ Cm}$$

d'où : $d_1 = 7.3 \text{ Cm}$ et $d_2 = 14 \text{ cm}$.

donc : la conduction dans l'air est classique.

Le flux de chaleur conductif, arrivant sur le bain d'Azote à travers l'air entre les surfaces A_3 et A_4 , se calcule par la formule suivante:

$$Q_{cl} = \bar{K}_{air} * \bar{A}_1 \frac{\Delta T}{d_1}$$

A.N :

$$K_{air} = 5.92 \cdot 10^{-5} \text{ w/cm k} \quad (\text{voir annexe III.3})$$

$$d_1 = 7.3 \text{ cm}$$

$$A_1 = \Pi \frac{(D_3 + D_4)}{2} L_3 = 840.59 \text{ cm}^2$$

$$Q_{cl} = 1.44 \text{ w}$$

b) De la même manière, on peut calculer le flux de chaleur conductif correspondant aux surfaces A_5 et A_6 .

$$Q_{c2}' = \bar{K}_{air} \bar{A}_2 \frac{\Delta T}{d_2}$$

A.N :

$$\bar{A}_2 = A_5 = \pi \frac{D_5^2}{4} = 176.71 \text{ cm}^2$$

$$d_2 = 14 \text{ cm}$$

$$Q_{c2} = 0.158 \text{ w}$$

On regroupe tous ces résultats (en Watt) sur le tableau suivant:

$Q_1(\text{W})$	$Q_r(\text{w})$	$Q_{rc}(\text{w})$	$Q_c(\text{w})$	$Q_{cv}(\text{w})$
5.59	5.82	5.51	0.125	1.6

Tableau N°2 Les différentes entrées de chaleur dans le cryostat.

$$\text{On pose : } Q_r' = Q_r + Q_{rc} + Q_c + Q_{cv} = 13.055 \text{ w}$$

$$\text{On pose aussi : } Q_s = Q_{rc} + Q_c + Q_{cv} = 7.235 \text{ w}$$

IV.1.4 Echange thermique parfait avec rayonnement au col :

IV.1.4.1 Bilan énergétique :

L'introduction du flux de chaleur par rayonnement dans le col change le bilan énergétique déjà déterminé. En isolant un élément du col (figure N°3), on peut écrire :

$$Q_x + q_{rx} = Q + Q_{x+dx}$$

$$\frac{\partial Q_x}{\partial x} dx + q_{rx} = Q \quad (8)$$

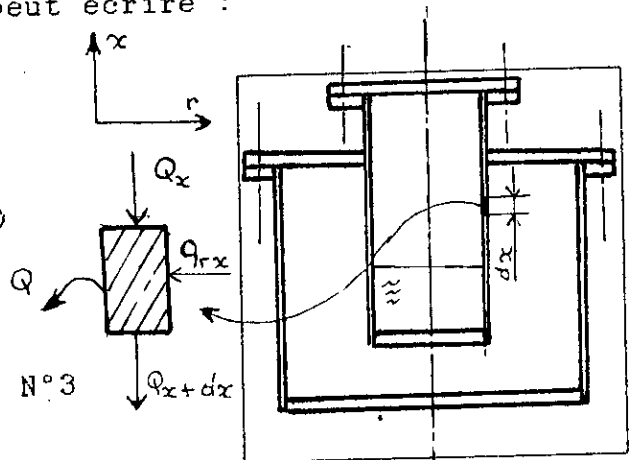


Figure N°3

Sous l'hypothèse que la surface ds_1 rayonné seulement sur la surface ds_2 , déjà très proche d'elle, q_{rx} peut s'exprimer sous la forme :

$$q_{rx} = f_{12} ds_1 \sigma (T_a^4 - T^4)$$

$$\text{ou} \quad q_{rx} = f_{12} P_1 dx \sigma (T_a^4 - T^4)$$

$$\text{avec} \quad f_{12} = \frac{\epsilon_1 \epsilon_2}{\epsilon_2 + \frac{P_1}{P_2} (1 - \epsilon_2) \epsilon_1}$$

L'équation (8) devient :

$$dQ_x + F_{12} P_1 dx \sigma (T_a^4 - T^4) = m cp dT \quad (9)$$

$$\text{soit : } \frac{d}{dx} (A K(T) \frac{dT}{dx}) + F_{12} P_1 \sigma (T_a^4 - T^4) = m cp \frac{dT}{dx}$$

Ainsi le phénomène de transfert thermique dans le col est régi par une équation différentielle, non linéaire, avec conditions aux limites :

$$x = 0, T(x=0) = T_1 = 77 \text{ k}$$

$$x = L, T(x=L) = T_f = 273 \text{ k}$$

qui peut être résolu par la méthode des différences finies, car cette méthode se prête bien pour ces types de problèmes.

L'expression de la conductivité thermique $K(T)$ est déterminée en faisant une interpolation de Lagrange entre 3 points choisis être 77 et 300k.

$$\text{on : } K(T) = (-1.16922 T^2 + 752.12561 T + 29591.838) 10^{-6} \text{ W/cm k}$$

$$\text{où sous la forme : } K(T) = a T^2 + b T + c$$

L'équation (9) devient :

$$\frac{d}{dx} [(aT^2 + bT + c) \frac{dT}{dx}] - \frac{m cp}{A} \frac{dT}{dx} + \frac{P_1}{A} F_{12} \sigma (T_a^4 - T^4) = 0$$

$$(aT^2 + bT + c) \frac{d^2 T}{dx^2} + (2aT + b) \left(\frac{dT}{dx}\right)^2 - \frac{mcp}{A} \frac{dT}{dx} + \frac{P_1}{A} F_{12} \sigma (T_a^4 - T^4) = 0 \quad (10)$$

Les développements des fonctions $T(x+\Delta x)$ et $T(x-\Delta x)$ en séries de Taylor sont représentés dans l'annexe III.4.

Si on introduit les différentes fonctions dans l'équation précédente (10) et en ajoutant :

$$\Delta x = \frac{L}{N}, \quad Z = \frac{A}{L}, \quad m = \frac{\beta}{\phi} Q_1, \quad Y = P_1 L, \quad \phi = \frac{Q_1 + Q_r}{Q_1}$$

$$dQ_x + F_{12} P_1 dx \sigma (T_a^4 - T^4) = m cp dT \quad (9)$$

$$\text{soit : } \frac{d}{dx} (A K(T) \frac{dT}{dx}) + F_{12} P_1 \sigma (T_a^4 - T^4) = m cp \frac{dT}{dx}$$

Ainsi le phénomène de transfert thermique dans le col est régi par une équation différentielle, non linéaire, avec conditions aux limites :

$$x = 0, T(x=0) = T_1 = 77 \text{ k}$$

$$x = L, T(x=L) = T_f = 273 \text{ k}$$

qui peut être résolu par la méthode des différences finies, car cette méthode se prête bien pour ces types de problèmes.

L'expression de la conductivité thermique $K(T)$ est déterminée en faisant une interpolation de Lagrange entre 3 points choisis être 77 et 300k.

$$\text{on : } K(T) = (-1.16922 T^2 + 752.12561 T + 29591.838) 10^{-6} \text{ W/cm k}$$

$$\text{où sous la forme : } K(T) = a T^2 + b T + c$$

L'équation (9) devient :

$$\frac{d}{dx} [(aT^2 + bT + c) \frac{dT}{dx}] - \frac{m cp}{A} \frac{dT}{dx} + \frac{P_1}{A} F_{12} \sigma (T_a^4 - T^4) = 0$$

$$(aT^2 + bT + c) \frac{d^2 T}{dx^2} + (2aT + b) \left(\frac{dT}{dx}\right)^2 - \frac{mcp}{A} \frac{dT}{dx} + \frac{P_1}{A} F_{12} \sigma (T_a^4 - T^4) = 0 \quad (10)$$

Le développement des fonctions $T(x+\Delta x)$ et $T(x-\Delta x)$ en séries de Taylor sont représentés dans l'annexe III.4.

Si on introduit les différents fonctions dans l'équation précédente (10) et en ajoutant :

$$\Delta x = \frac{L}{N}, \quad z = \frac{A}{L}, \quad m = \frac{\beta}{\phi} Q_1, \quad Y = P_1 L, \quad \phi = \frac{Q_1 + Q_r}{Q_1}$$

$$(2aT_i+b) \left(\frac{T_{i+1}-T_{i-1}}{2} \right)^2 + \left[2(aT_i^2+bT_i+c) - \frac{\beta Q_1 c p}{\phi Z N} \right] \left(\frac{T_{i+1}-T_{i-1}}{2} \right)^2 + \frac{Y F_{12} \sigma}{N^2 Z} (T_a^4 - T_i^4) + 2(aT_i^2+bT_i+c) (T_{i-1}-T_i) = 0 \quad (11)$$

IV.1.5 Résultats théoriques :

Un programme numérique est réalisé pour étudier l'échange thermique dans le col du cryostat, son organigramme est présenté dans l'annexe IV.

La variation de ϕ dans ce programme représente le rapport du flux de chaleur conductif Q_1 à la somme des flux de chaleur ($Q_1+Q_{r'}$). Entre 0 et 1, ϕ est équivalent à un contrôle de qualité de l'isolation du cryostat, c'est à dire, du taux d'évaporation de l'Azote liquide :

pour $\phi = 1 \longrightarrow Q_{r'} = 0$: c'est le régime auto-alimenté où le flux Q_1 engendre le débit des vapeurs qui sortent intégralement du cryostat. Ce cas est théorique puisqu'en réalité le flux de chaleur $Q_{r'}$ ne s'annule jamais.

pour $\phi = 0 \longrightarrow Q_1 = 0$: c'est le régime où les vapeurs d'azote intercepte tout le flux Q_1 .

Les Résultats théoriques, trouvés, portent sur l'identification de :

- la variation du flux de chaleur $Q_1+Q_{r'}$ en fonction du flux de chaleur Q_r .
- la variation de Q_1 en fonction du débit des vapeurs froides m .
- La distribution de température sur le col en fonction d'une valeur de débit m .

A/ Pour l'échange thermique parfait dans un col isolé latéralement.

1) Sur la courbe $Q_1 + Q_{r'} = f(Q_{r'})$, on remarque que lorsque $Q_{r'}$ augmente, Q_1 diminue jusqu'à ce qu'il s'annule, en ce point les vapeurs d'azote interceptent tous le flux de chaleur conductif arrivant sur le bain d'Azote.

Le point c de la courbe représente la somme des flux $Q_1 + Q_{r'}$ relatif au flux $Q_{r'} = 13.055$ w déterminé précédemment, on trouve :

$$Q_1 + Q_{r'} = 15.2 \text{ W}$$

soit $Q_1 = 2.145 \text{ W}$

on calcule directement le débit des vapeurs d'azote :

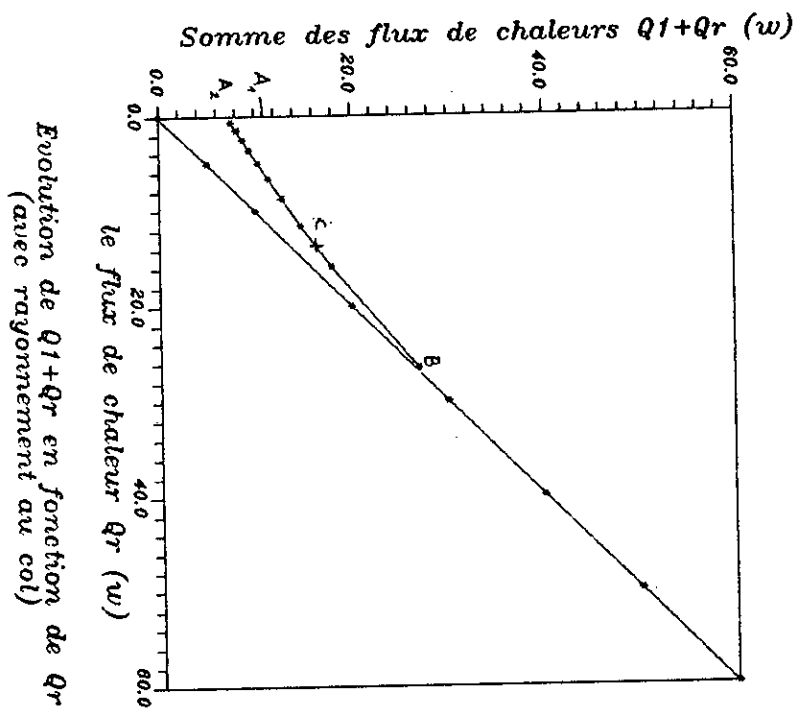
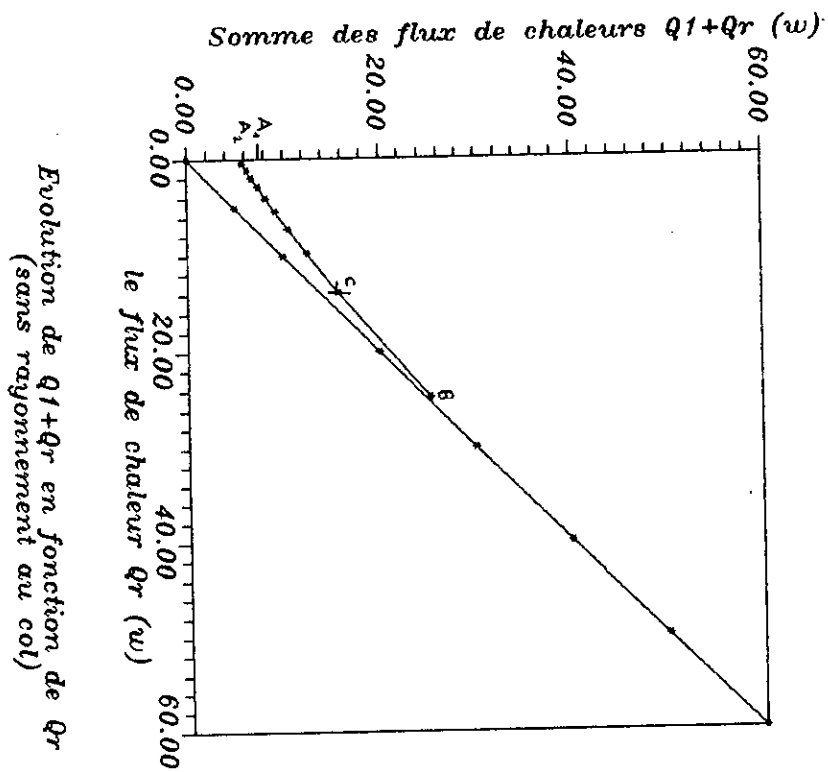
$$m = \text{bita} (Q_1 + Q_{r'})$$

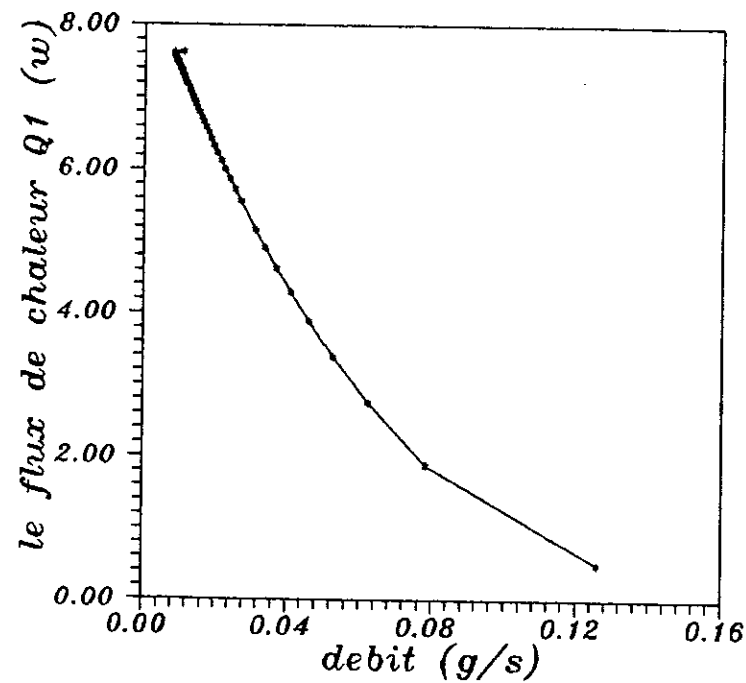
$$m = 0.076 \text{ g/s}$$

Au point Az, correspondant au régime d'auto-alimentation, Q_1 est inférieur au flux de chaleur conductif arrivant au bain d'Azote dans le cas où le col n'est pas ventilé.

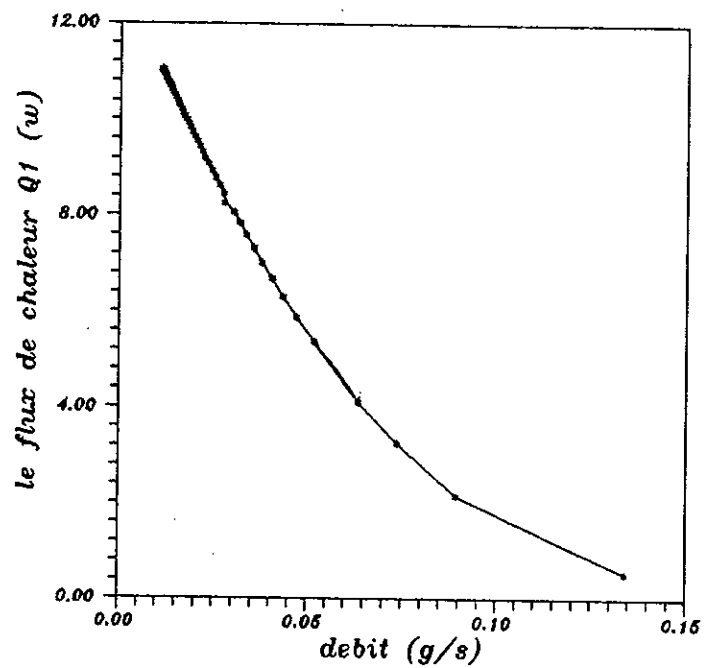
2) La courbe Q_1 en fonction du débit m : Au point B, le débit est nettement supérieur qu'au point Az, on conclut que l'évaporation de l'azote liquide est provoquée principalement par le flux de chaleur $Q_{r'}$, soit encore, par le flux de chaleur par rayonnement Q_r puisque les autres pertes sont considérées constantes.

3) La courbe (1) correspond à une distribution de température linéaire, le col n'est pas refroidi par les vapeurs d'azote. Lorsque le débit de vapeur augmente, on remarque que le gradient de température à une distance x du col diminue, le refroidissement du col est meilleur et le flux de chaleur Q_1

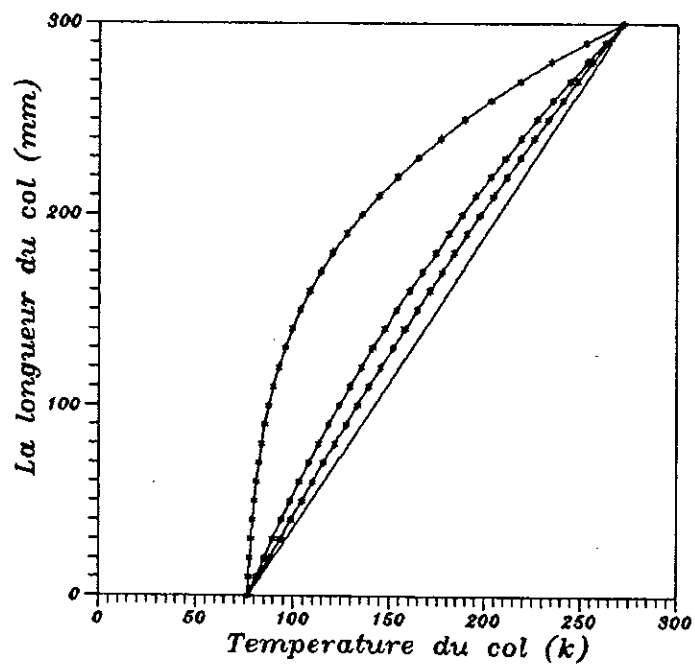




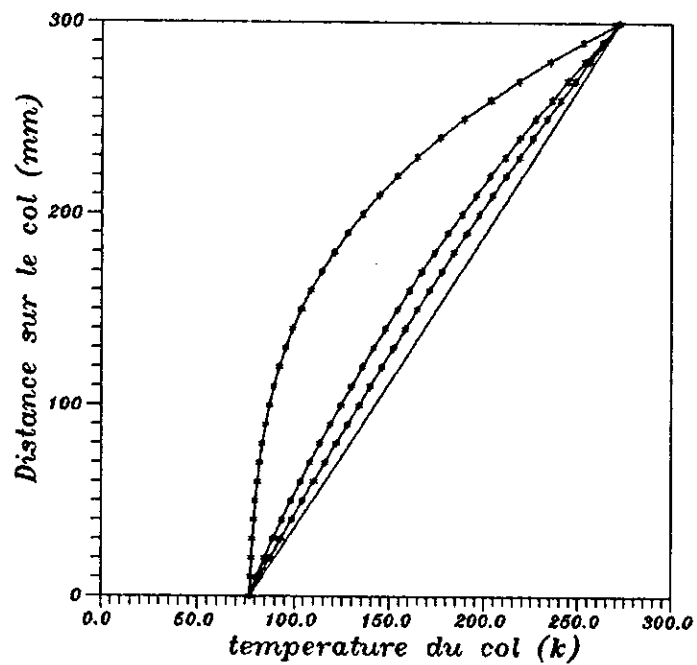
Evolution du flux de chaleur Q_1
 en fonction de debit d'evaporation
 (sans rayonnement au col)



Evolution du flux de chaleur Q_1
 en fonction du debit de vaporisation
 (avec rayonnement au col)



Distribution de la température
sur la longueur du col
(Sans rayonnement au col)



Distribution de la température
sur la longueur du col
(avec rayonnement)

devient encore plus petit.

La courbe (2) présente un très petit gradient de température en bas du col. Dans ce cas, son refroidissement est amélioré avec l'augmentation du débit pour une certaine surface d'échange.

B/ Pour l'échange thermique sans rayonnement au col.

Les résultats de cette étude sont identiques à celle de la précédente, ils seront amplifiés à cause du flux de chaleur par rayonnement qui arrive sur le col du cryostat. La différence des résultats est présentée sur le tableau suivant :

	m		Qr'		Qr		Qs		Q1	
	Sr	Ar	Sr	Ar	Sr	Ar	Sr	Ar	Sr	Ar
A1	8.4	1.12	-	-	-	-	-	-	7.64	11.
A2	28	36.4	.466	.610	-	-	-	-	5.36	7.0
B	126	134	24.8	26.4	17.5	19.2	7.24	7.24	1.05	0.5
C	2128	2268	13,1	13.1	5.82	5.82	7.24	7.24	2.15	3.2

Tableau N° 3 Resultat comparatifs entre les deux cas d'échange de chaleur.

Sr : sans rayonnement au col.

Ar : Avec rayonnement au col.

Remarques .

- Le point A1 représente le cas d'un col sans ventilation, on remarque que le flux conductif Q_1 est nettement supérieur aux autres. Aussi on remarque qu'il dépasse celui calculé précédemment dans le cas d'une distribution linéaire de la température sur le col.

- Au point A2, Q_s n'a aucun sens physique puisque déjà Q_r est égal à 0.466 W, mais nous pouvons dire qu'en cas d'élimination du flux Q_r , le débit de vapeur devient très petit.

- Au point B, on remarque bien l'influence du flux de chaleur Q_r sur la valeur du débit.

- Au point C, on estime le taux d'évaporation du liquide d'azote à 2,23 g/s, c'est la valeur qu'on doit tester sur notre cryostat.

En conclusion, on peut dire que l'influence du flux de chaleur par rayonnement est totale sur l'évaporation de l'Azote liquide.

IV.2 Etude expérimentale.

Après un mois de mise sous vide du cryostat, celui-ci rempli d'Azote liquide manifeste un givrage au bas du cylindre extérieur. Une lecture du vide a indiqué la montée en pression jusqu'à 400 Pa et le détecteur à Hélium a détecté des microfuites au niveau de la vanne. Un nouveau pompage est exécuté et la pression est fixée à 4 Pa .

Le coté expérimental de notre travail est réalisé juste Après, il consiste en l'estimation du taux d'évaporation du liquide cryogénique en fonction de la variation de la hauteur du col. Un système de repérage du niveau du liquide est coféctionné; c'est un flotteur couvert d'une feuille de papier Aluminium.

Les résultats de l'expérience obtenus sont présentés sur le tableau(4) comptant aussi le flux de chaleur total

correspondant :

temps de repérage de la hauteur du col (mn)	Hauteur du col (mm)	Débit de vapeur d'Azote (g/s)	Flux de chaleur total $Q_T = Q_1 + Q_r$ (w)
0	12	-	-
34	14	0.136	27.23
70	16	0.128	25.6
108	18	0.122	24.36
148	20	0.116	23.16
189	22	0.113	22.6
231	24	0.110	22.045
274	26	0.108	21.53
319	28	0.103	20.60
365	30	0.101	20.13
412	32	0.980	19.70
416	34	0.94	18.80
514	36	0.87	17.47
570	38	0.83	16.53

Tableau N°4 Résultats de l'essai de remplissage du cryostat

A chaque prise de mesure, on commet une erreur de lecture sur la hauteur L du col et sur le temps t correspondant .

On estime :

$$\Delta t = 10 \text{ s}$$

$$\Delta L = 1 \text{ mm}$$

le calcul du débit est donné par:

$$\dot{m} = \frac{\rho \pi D h}{t}$$

avec h la hauteur du volume d'Azote liquide évaporé pendant le temps t (h = 2 cm)

On a :

$$\Delta h = 2 \Delta L = 2 \text{ mm}$$

On peut calculer l'erreur absolue du débit avec:

$$\Delta \dot{m} = \dot{m} \left(\frac{\Delta h}{h} + \frac{\Delta t}{t} \right)$$

La valeur maximale de l'erreur du débit est calculée à partir du tableau N° 5 :

$$\Delta \dot{m} = 0.0075 \text{ g/s}$$

Cette erreur de débit peut être plus grande et elle se répercute sur la perte thermique totale :

$$\Delta Q_{\text{Total}} = \Delta \dot{m} H_v$$

$$\Delta Q_{\text{Total}} = 1.5 \text{ w}$$

La valeur du taux d'évaporation évaluée théoriquement pour un col de 30cm ($\dot{m} = 0.081 \text{ g/s}$) est confrontée à la valeur expérimentale ($\dot{m} = 0.101 \text{ g/s}$), on remarque que la différence est de 0.02 g/s ; soit; 4 w de pertes thermiques, par ailleurs l'erreur relative est de 24.69 % . Cette erreur peut devenir plus petite si on utilise des instruments de mesure précis.

IV.3 Conclusion .

Il est clair que le modèle d'échange thermique parfait est assez acceptable pour estimer les taux d'évaporations dans l'enceinte de stockage cryogénique. Le col est le composant important dans le cryostat, il sert à récupérer l'enthalpie des vapeurs froides d'Azote.

Notre étude expérimentale manque de suite par faute d'instruments de mesure encore non disponibles. En plus de l'estimation du taux d'évaporation du liquide cryogénique avec un compteur à gaz, il faut déterminer la distribution de température sur le col et à travers les vapeurs d'Azote en utilisant des sondes de température, la différence entre ces deux températures renseigne sur le mode de transfert et sur la stratification des gaz. On peut aussi estimer le flux de chaleur par rayonnement reçu par le bain d'Azote à partir de la courbe de (Wexler[1]), cela est possible en interposant dans le liquide cryogénique une résistance de chauffe.

Enfin, le cryostat démontable peut être destiné à plusieurs manipulations comme :

- *L'amélioration du vide ,
- *L'interposition d'écrans entre les cylindres et l'étude de l'influence de leur positionnement sur le flux de chaleur par rayonnement.

CHAPITRE V

**DESCRIPTION GENERALE du
LIQUEFACTEUR D'AIR LIQUIDE PLA107 et
MISE FIN POINT des DIFFERENTES de SA
REMISE EN MARCHE**

SOMMAIRE CHAPITRE V

	page
V.1	Introduction 72
V.2	Caractéristiques techniques 72
V.3	Processus interne du liquéfacteur 73
V.4	Description générale des organes mécaniques ..76
V.5	Système d'huile de graissage 78
V.6	Système de gaz 81
V.7	Pression de gaz dans la machine 82
V.8	Sécurité 84
V.9	Equipement électrique 85
V.10	Énumération des différents problèmes de la remise en marche du liquéfacteur 85
V.11	Suggestions..... 87

V.1 Introduction .

Plusieurs modèles d'installation cryogéniques plus performants et destinés à la liquéfaction des gaz permanents ont fait leur apparition. Parmi eux on cite :

- Le PLA 107 : destiné à la liquéfaction de l'air
- Le PLA106 : qui est une modification de la tête du PLA 107 liée a une colonne distillatrice, produit de l'Azote et de l'oxygène liquides.

Ce sont des cryogénérateurs monocylindres, il peut exister des cryogénérateurs à quatre cylindres d'une capacité de production plus élevée.

Le PLA 107 disponible à l'école nationale polytechnique est composé d'un cryogénérateur à cylindre unique, d'une tête cryogénique avec échangeur à froid, et d'accessoires nécessaires au bon fonctionnement du système.

Le moteur électrique et le cryogénérateur sont montés sur un même axe à l'aide d'un volant flexible. L'installation est équipée de sécurités pour assurer son fonctionnement continue

Dans ce chapitre, nous exposerons une description générale de l'installation. Notre objectif n'est pas la remise en marche du liquéfacteur, mais le dénombrement des différentes contraintes rencontrées durant le démontage de la machine (surtout le manque d'outillage de travail et les pièces de rechanges). Nous proposerons des solutions pour mener à terme l'objectif de la remise en marche.

V.2 Caractéristiques techniques :

- Pression moyenne de travail : 25 bar ---> 50 Hz.
dans le cryogénérateur 23 bar ---> 60 Hz.
- Gaz de travail : Hydrogène : 15 g , Hélium : 30g.
- Course du piston : 52 mm.
- Course du refouleur : 30 mm.

- Diamètre du cylindre : 80 mm.
- Huile de lubrification : 1,25l d'huile cryogénique "HV165TQ".
- Entraînement : . moteur électrique 3 phases 11 KW.
. vitesse de rotation :
1450 tr/min ---> 50 Hz.
1750 tr/min ---> 60 Hz.
sens de rotation à droite, vue du moteur vers la machine .
- Poids : 500 Kg.
- Eau de refroidissement : Consommation 0,75 m³/h.
Pression d'entrée : 1,7 bar.
Température d'entrée : 25°C.
- Encombrement et hauteur : environ 2 x 1 m² sans accessoires.

V.3 Processus interne de liquéficateur :

Le gaz réfrigérant ,utilisé dans le processus interne du liquéficateur, est l'Hydrogène ou l'Hélium , qui ne se liquéfie pas à la température de travail.

Pendant la révolution du vilebrequin , ce processus évolue suivant le cycle de Sterling. Les régimes de compression et de détente, se rapprochant de l'adiabatique, sont réalisés par le mode d'entraînement à grande vitesse. Les systèmes Bielle-manivelle liés au piston et au refouleur sont décalés géométriquement de façon à conserver le déphasage indispensable des pistons , de sorte que les quatres phases du cycle se raccordent l'une à l'autre.

Phase I (Evolution 1 à 2) :

Le gaz de travail se trouve en grande partie dans l'espace de compression où il est comprimé par le piston de la pression P1 à la pression P maximum.

Phase II (Evolution 2 à 3) :

Lorsque le piston est stationnaire , le refouleur conduit le gaz comprimé à volume constant vers l'enceinte de détente. Le gaz passe par le refroidisseur où la chaleur de compression est évacuée par le régénérateur (dont le froid du cycle précédent refroidit le gaz) et par les fontes intérieurs du condensateur. Etant donné la chute de température et le volume constant , la pression baisse de P_{max} à P_2 .

Phase III (Evolution 3 à 4) :

Le gaz se trouve principalement dans l'espace de détente , le piston et le refouleur se déplaçant des lors ensemble vers le bas. Le gaz se détend , la température diminue et la pression descend de P_2 à P_{min} .

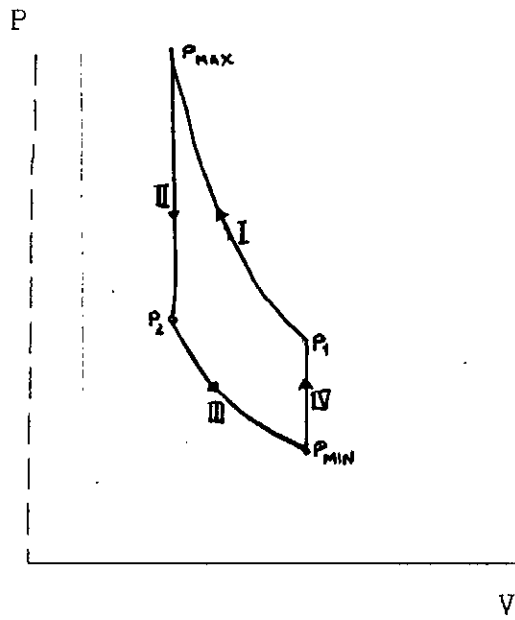
Phase IV (Evolution 4 à 1):

Le gaz froid est retourné dans l'espace de compression par le refouleur à travers les encoches intérieures , le régénérateurs et le refroidisseur d'eau. Le piston est stationnaire au fond et le volume reste le même.

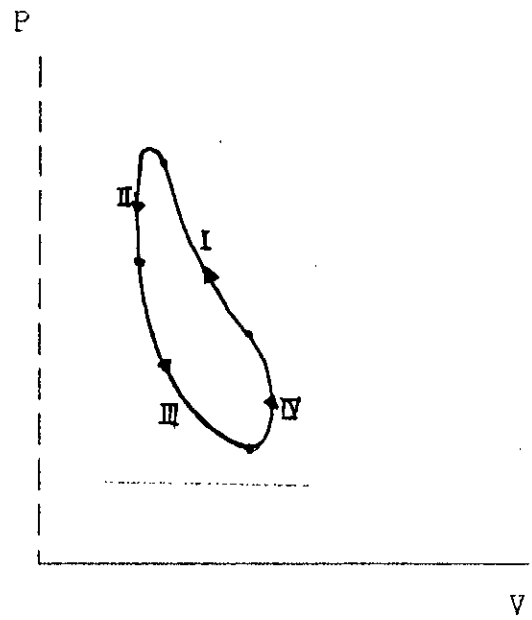
Dans le condensateur , le froid utile est d'abord fourni, ensuite le gaz réabsorbe la chaleur emmagasinée dans le régénérateur. pendant la phase II, étant donné l'augmentation de température, la pression augmente de P_{min} à P_1 .

- L'accomplissement pratique des quatres phases demande Un mouvement intermittent du piston et du refouleur.

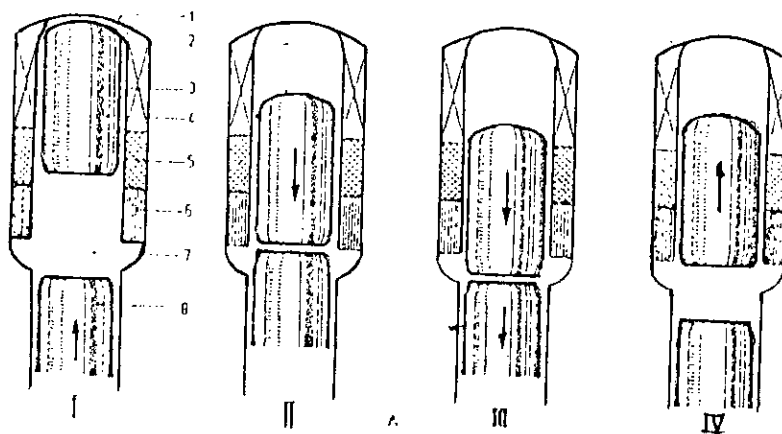
Processus cycle de stirling :



Cycle de stirling théorique



Cycle de stirling réel



V.4 Description générale des organes mécaniques :

1- Carter :

Le Carter de type ferme, est rempli de gaz qui peut être introduit dans l'espace de travail par le système de remplissage interne. L'étanchéité au vilebrequin est obtenue par des bagues d'étanchéité et des joints toriques .

Les avantages d'un carter fermé sont :

- Le piston est soumis à une faible différence de pression, il est construit, avec les bielles, plus légers.

- L'étanchéité au passage du vilebrequin est meilleur et plus simple à réaliser que celle du piston.

2- Cylindre :

Le cylindre est constitué d'un corps où est logée la chemise. L'espace prévu entre la chemise et le corps du cylindre est divisé en deux. Dans l'espace inférieur circule l'huile de machine pour le refroidissement du cylindre. L'huile entre dans l'espace par le bas et elle le quitte par le tuyau de trop plein. L'espace supérieur est l'espace-tompon qui communique avec l'espace de travail et le carter. L'obturation de ces espaces est assurée par des joints toriques.

3- Embiellage du piston:

Le piston est entraîné par le vilebrequin , par l'intermédiaire de la broche de piston et de la bielle.

La chemise de piston est montée sur la broche de piston à l'aide du manchon de collage et de l'appui flexible.

4- Embiellage du refouleur

Le refouleur est entraîné par le vilebrequin et par l'intermédiaire de la tige , de la crosse et de la bielle.

Le passage de la tige de refouleur dans la partie médiane du piston est étanche au gaz et à l'huile .

5- Piston

Le piston est équipé de 2 segments d'étanchéité et d'un segment racleur d'huile . La montée d'huile de graissage le long du piston est évitée par :

- Le segment racleur
- La forme légèrement conique des segments.
- La conicité de la partie supérieure du piston.

6- Refouleur :

Le refouleur est constitué par un corps et un capot. Le corps est muni d'une bague de guidage ,ayant une surface de contact en bois imprégnée de graisse, et d'une bande d'étanchéité et coulisse dans la chemise du refroidisseur comme un piston. La bande d'étanchéité est en nylon et est pressé contre la chemise par deux segments.

La capot à paroi d'acier mince est bourré d'ouate pour éviter des pertes de froid par conduction vers les organes de machine plus chauds. Le corps de refouleur est fixé sur la tige par la vis de pression comportant une vis de blocage qui l'immobilise contre les coquilles.

7- Refroidisseur . Régénérateur . Condenseur

Le refroidisseur est muni de plusieurs fentes par lesquelles passe le gaz Hydrogène. L'eau de refroidissement coule autour du refroidisseur et enlève la chaleur de compression. Le Régénérateur est composé d'une masse de fins fils de cuivre. Cette masse est capable d'absorber ou d'émettre rapidement de la chaleur.

Dans le générateur, le gaz est refroidi à basses températures en passant de la chambre de compression dans la chambre de détente.

La chaleur prise du gaz est temporairement emmagasinée dans le régénérateur. Le gaz réabsorbe cette chaleur et se chauffe à la température du refroidissement au moment où il passe de la chambre de détente vers la chambre de compression. Le corps de la tête du condenseur est muni d'encoches à l'intérieur, tandis que les encoches extérieures servent à agrandir la surface de refroidissement.

8- Tube d'écoulement

Le tube de décharge sert à l'évacuation du condensat. Il est constitué par la chemise extérieure, dans laquelle est monté le tuyau intérieur de verre sur amortisseur. Pour éviter les pertes de froid, le tuyau est à double paroi argentée à l'intérieur et l'espace entre les deux parois est sous vide.

9- Accouplement de la machine :

L'accouplement se compose du disque d'accouplement et du volant. Le disque d'accouplement est fixé à l'axe du moteur au moyen d'un canon de calage, d'une clavette et d'une vis de blocage.

Dans le disque d'accouplement sont logés trois manches "Melastique" qui sont bloqués par une rondelle d'arête. Les trois broches montés dans le volant sont introduites dans ces manches. La connexion entre le moteur et la machine est effectuée par les 3 manchons "Melastiques" et les broches. Les manchons "Melastique" rendent l'accouplement légèrement flexible, de sorte que la déviation inévitable dans l'alignement du moteur n'exercent pas une influence nuisible à la machine.

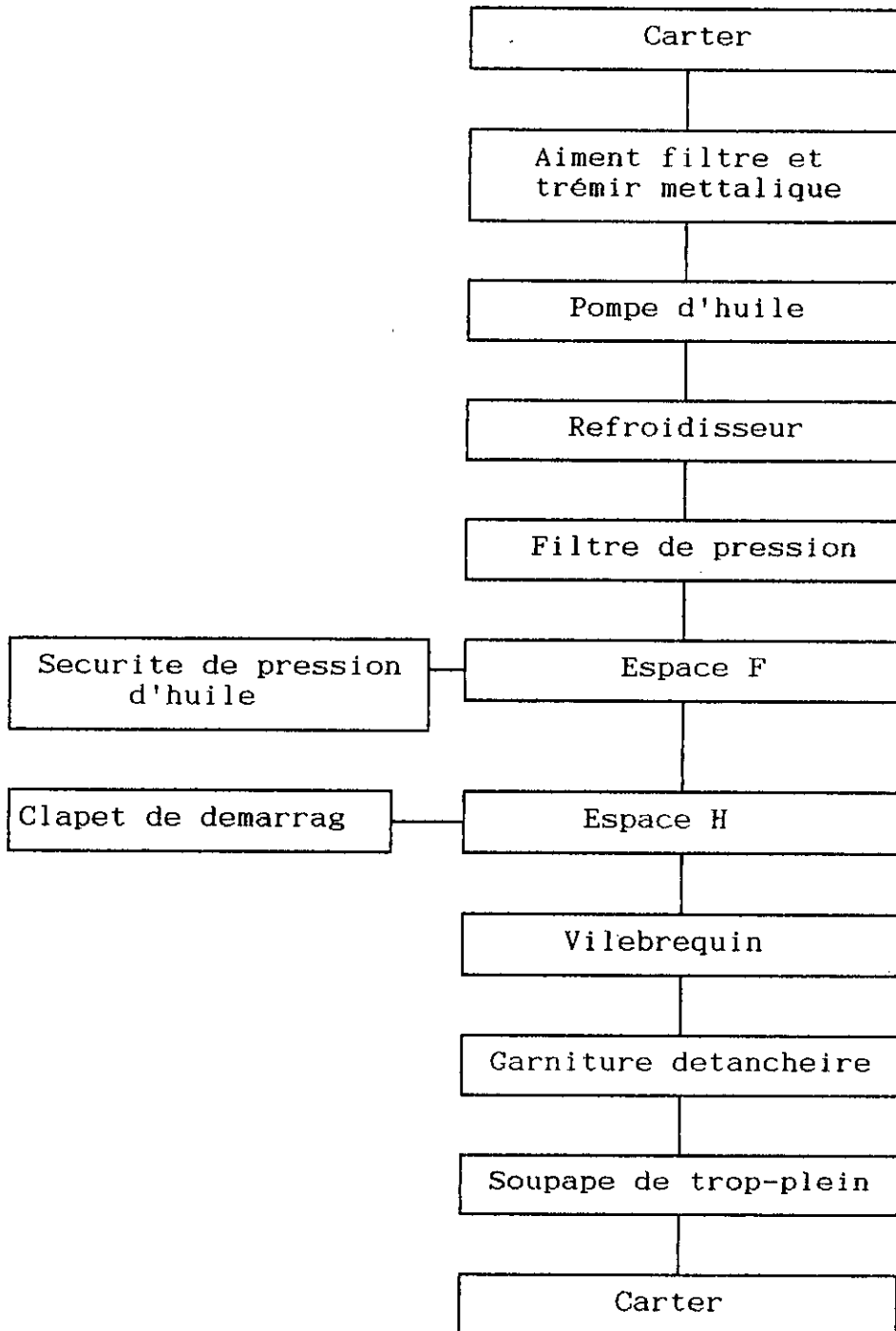
V.5 Système d'huile de graissage :

L'huile se rassemble au fond du carter où sont logés un aimant filtre qui capte des particules de fer se trouvant dans l'huile et un trémis métallique qui capte des particules de

poussière.

La pompe à engrenage aspire l'huile par un canal et le refoule dans l'espace prévu autour des bagues de filtrage et du refroidissement puis vers l'espace autour du corps de pompe. Cet espace est en communication avec la chambre des engrenages d'entraînement connectés à la soupape de démarrage. L'huile passe dans l'alésage du vilebrequin vers les coussinets de bielle et l'espace autour de la garniture d'étanchéité de l'axe en traversant la bague de retenue d'huile. La broche de piston est graissée par l'intermédiaire des alésages pratiques dans la bielle du piston. La crosse et la broche sont graissées par projection d'huile. Les paliers sont graissés par l'huile qui revient au carter. Depuis l'espace prévu autour de la garniture d'étanchéité de l'axe, l'huile passe par l'intermédiaire de la soupape de trop plein à l'espace de refroidissement du cylindre; puis par l'intermédiaire du tuyau de trop plein, elle retourne au carter.

Systeme d'huile :



V.6 Système de Gaz :

La bouteille contenant le gaz de travail est équipée d'un détendeur réglé à 19 bars et raccordée à la prise d'amenée d'Hydrogène par l'intermédiaire d'un dessiccateur et d'une conduite d'amenée. Pour éviter la pénétration d'huile de l'écluse de remplissage dans la conduite d'Hydrogène, la prise est équipée d'un clapet de retenue. Une vis capillaire empêche le gaz, lors de remplissage d'entrer dans la machine à trop grande vitesse. L'écluse de remplissage permet d'ajouter de l'huile lors du fonctionnement de la machine, elle est équipée d'une vanne d'écluse et d'une vanne de purge.

Le crygénérateur est rempli soit de 15 g d'Hydrogène ou de 30g d'Hélium afin d'obtenir la pression de travail moyenne de 25 bars (50 Hz) ou 23 bars (60 Hz). Un commutateur de pression évite une pression excessive, il est réglé à 27 bars (50 Hz) ou 25 bars (60 Hz). En cas où l'Hydrogène est utilisé, une conduite d'évacuation raccordée au boîtier de la soupape d'évacuation ainsi qu'une soupape d'évacuation manuelle doivent communiquer à l'air libre.

Le gaz entre dans le carter à travers la soupape d'écluse et retourne à l'espace de travail par le système de remplissage interne. Il traverse les éléments suivants : le séparateur d'huile, le filtre d'huile, l'espace tampon, la soupape de remplissage et le clapet de détente.

La soupape de remplissage est une soupape de retenue qui empêche le retour du gaz lorsque la pression de travail est supérieur à celle dans l'espace tampon. Le clapet de détente assure une pression de travail minimale afin qu'elle soit inférieur à la pression de gaz maximale dans le carter. De ce fait, la force générée par la pression de gaz sur le piston sera alternativement dirigée vers le haut et vers le bas.

L'espace de travail et l'espace tampon sont connectés entre eux

par la soupape de démarrage. Cette soupape est fermée par la pression d'huile de lubrification et ouverte par un ressort lorsque la pression baisse. Quand la soupape est ouverte, l'espace de travail est ainsi agrandi par l'espace tampon et le tampon, de ce fait quand le cryogénérateur démarre, il n'est que faiblement chargé. Dès que la pression d'huile est suffisante, la soupape de démarrage se ferme. Quand la machine est arrêtée, la soupape s'ouvre afin qu'il n'y ait presque plus de compression ni de détente.

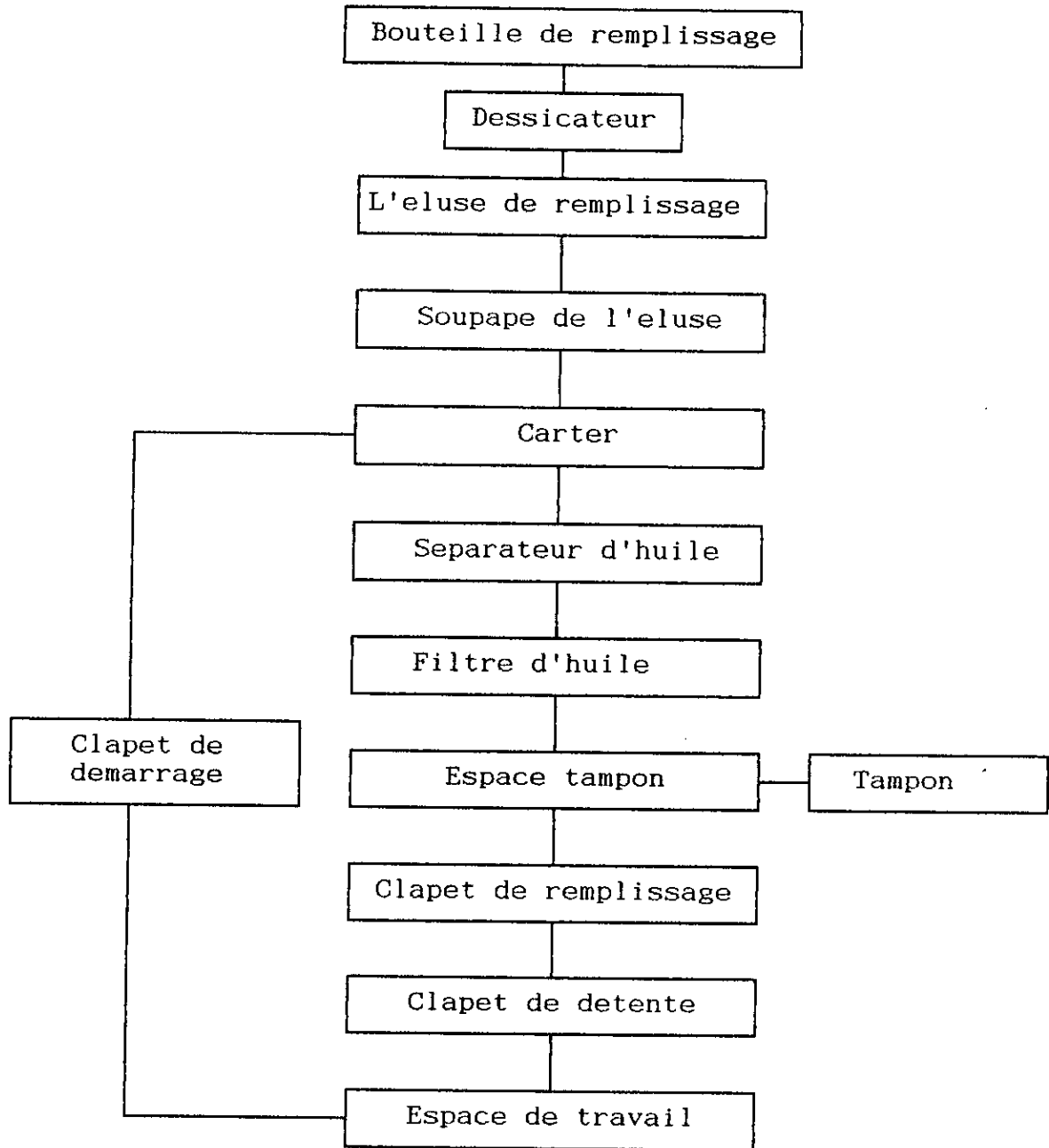
V.7 Pression de gaz dans la machine:

Un manomètre, raccordé par un capillaire à l'espace de travail autour de la soupape de remplissage, sert à mesurer la pression moyenne de remplissage et la pression moyenne de travail. Cette dernière doit être contrôlée une heure après le démarrage de la machine. Dans les conditions standards, on relève les mesures de pressions suivantes [3]:

	50 HZ	60 HZ
Pression de remplissage (machine à "T" ambiante) (bar)	19	17
Pression de travail moyenne (bar)	23,5 - 25,5	20,5 - 22,5
Pression de gaz à l'arrêt de la machine (Pression de travail moy 25 bars) (bar)	19,5 - 21	16,5 - 18

Tableau N°1 Les différents pressions dans la machine

Systeme de gaz :



V.8 Sécurité :

1- Sécurité de pression d'eau avec pompe à jet d'eau :

L'eau de refroidissement est nécessaire pour enlever la chaleur de compression . D'abord; l'eau de refroidissement passe par le refroidisseur d'huile et par le refroidisseur principal. Une sécurité de courant d'eau est montée , elle fonctionne automatiquement, et si le débit est moins de 0,5 m³/h, elle souvrira et , par conséquent, il interrompt le circuit de contrôle du commutateur . La quantité d'eau requise est de 0,75m³/h avec une pression de 1,7 à 2,7 bar et une température 25°c à l'entrée .

2- Sécurité de pression d'huile.

Si lors du démarrage, la pression d'huile n'atteint pas la valeur normale, la machine s'arrête automatiquement. Si, lors du fonctionnement normal, la pression d'huile devient trop faible, le bouton de démarrage lâchera. La sécurité est formée par une membrane qui commande le commutateur. A l'avant de la membrane règne la pression d'huile, derrière la membrane dot règne une pression de gaz. Dans ce cas, l'espace derrière la membrane est mis en communication par un capillaire avec le carter, la membrane est commandée par la pression d'huile.

3- Contact électrique du manomètre:

La machine s'arrête en production si la pression dans l'installation dépasse les valeurs fixées. Dans ce cas la machine s'arrête également au démarrage.

4- Sécurité de pression:

Cette sécurité arrête la machine si la dépression dans le condenseur dépasse la valeur réglée.

4- Relais thématique du moteur électrique:

Le relais thermique est traversé par le courant électrique du moteur. Si le relais est trop chauffé; celui-ci interrompt le circuit de commande.

Un bouton de réenclenchement sur le boîtier de distribution remet le relais thermique en circuit.

V.9 - Equipements électriques :

Le cryogénérateur comporte un équipement standard composé des éléments suivants:

- Un moteur électrique 11 k
- Un commutateur étoile triangle pour moteur électrique .
- qui est monté dans le panneau de commande principal.
- Un système de commande actionnant le commutateur étoile triangle. Ce système se situe dans le panneau de commande.
- Le Commutateur pour sécurité protégeant le cryogénérateur en cas de fonctionnement impropre des circuits d'eau de refroidissement, de gaz ou d'huile, etc....Ces commutateurs sont dans les circuits du cryogénérateur.

10. Enumération des différents problèmes de remise en marche du liquéfacteur d'air liquide :

Après une description générale des différents constituants du liquéfacteur d'air liquide, nous exposons les difficultés de

sa remise en marche. Il est important de signaler dès le départ que ce liquéfacteur ainsi que d'autres appareils cryogéniques ne sont pas mis en fonctionnement depuis presque 10 ans.

1) La pompe d'amené d'eau de refroidissement au liquéfacteur sollicite un contrôle et une remise en état de fonctionnement. La sécurité mal adaptée au débit d'eau de refroidissement peut causer la destruction de l'appareil. En cas de fonctionnement il faut revoir toute l'installation sanitaire.

2) La remise en marche du liquéfacteur nécessite une installation électrique de commande du moteur et des sécurités de l'appareil. Cette dernière est hors circuit, l'alimentation en courant électrique est une nécessité fondamentale. Enfin, on ne peut pas parler d'équipement électrique prêt à fonctionner puisque lui-même a besoin d'une vérification profonde (travail d'un électricien).

3) Le cahier de maintenance de l'appareil n'existe pas, l'état général de fonctionnement est ignoré. Dans le cas où le circuit électrique et le circuit d'eau de refroidissement sont en état de fonctionnement, il peut surgir un danger potentiel si on essaie directement de mettre en marche la machine, le gaz interne H_2 qui peut sortir à cause de la mauvaise étanchéité de l'appareil peut provoquer un risque d'exploitation. On est obligé de vider l'appareil et de le mettre sous pression avec de l'air pour vérifier son étanchéité. Enfin, on doit indiquer que son fonctionnement exige un échauffement (par l'air) des parois interne pour éliminer l'humidité entassée sous forme de givre.

4) Les différentes étapes de montage et de démontage de l'appareil, les opérations de réglage et de contrôles (par exemple : le réglage des paliers, des butes, du jeu minimum entre le piston et le refouleur, de la sécurité d'eau de refroidissement, de la sécurité d'huile et de l'alignement de la machine et du moteur électrique) sont bien spécifiés dans les

notices de la machine. En panne depuis une dizaine d'années, il faut exécuter nécessairement presque toutes ces opérations avant la mise en marche; la cause est simple : il faut vérifier l'état des pièces, les nettoyer et terminer par le montage avec le réglage et le contrôle.

Tous ses travaux sont à réaliser si l'outillage nécessaire est disponible.

5) Le démontage du condenseur, du régénérateur et du refroidisseur à indiquer la manifestation d'un grippage au niveau du piston, le changement des segments, ainsi que ceux du refouleur est obligatoire. N'oublions pas aussi de dire que l'huile laissé pendant une longue durée perd sa qualité de lubrifiant. on parle dans ce cas du manque de pièces de rechange (les segment, les joints, l'axe de refouleur de régénérateur, l'huile de lubrification HV1 65 TQ).

V.11. Suggestions:

L'indication des pièces à changer dans le liquéfacteur passe par le démontage de la machine, cette opération exige un outillage simple et adéquat qu'on peut réaliser au niveau de l'atelier. Nous suggérons en plus une aide technique du centre de cryogénie du H.C.R. M^{er} MEBARKA, technicien au sein de cet établissement, ancien de métier peut surmonter toutes les contraintes de maintenance, son assistance peut être bénéfique.

CHAPITRE VI

CONCLUSION GENERALE

CONCLUSION GENERALE

Dans ce travail, nous avons réalisé un cryostat expérimental destiné à l'étude des échanges thermiques à basses températures. Le matériau choisi est l'acier inoxydable à cause de ses propriétés mécaniques et thermiques adéquates. La réalisation des pièces composant l'enceinte cryogénique est exécutée à l'atelier du Département de Génie Mécanique. Le soudage par le procédé T.I.G, assurant la bonne tenue mécanique et la bonne étanchéité, ainsi que l'obtention du vide sont aimablement réalisés à l'E.N.G.I de REGHAIA.

La comparaison des résultats expérimentaux et théoriques, pour un modèle d'échange parfait, exige, en plus de la détermination du taux d'évaporation du liquide d'azote, la détermination de la distribution des températures sur le col et les profils de vitesses et de température dans l'écoulement des vapeurs gazeuses. Cette objective n'est pas atteinte à cause du manque d'instruments de mesure. Enfin, le cryostat réalisé peut être considéré comme un bon support pour un éventuel départ dans ce domaine de recherche.

La disponibilité de l'azote liquide est essentielle pour toute expérience à basse température. Le fluide cryogénique peut être obtenu par un système de liquéfaction. La remise en marche du liquéfacteur d'air liquide, existant au laboratoire d'énergétique du département Génie Mécanique, est lié directement au manque de moyens techniques et matériels.

Après ce bref exposé de notre travail, on peut souligner les recommandations suivantes:

- La disponibilité des moyens de fabrication du cryostat (surtout le brut: l'Acier inoxydable) porte à cause que toute amélioration sur cette enceinte est possible. Notre projet verra sûrement une continuité dans le futur.
- Le procédé de soudage T.I.G. ainsi que d'autres marquent l'existence à l'atelier de Génie Mécanique. L'introduction de

ces types de soudage dans les T.P. complète la formation pratique de l'ingénieur.

- La remise en marche du liquéfacteur ou de toute l'installation cryogénique du laboratoire d'énergétique peut être facilement réalisé par l'assistance d'une aide technique de l'extérieur de l'Ecole. Monsieur MEBARKA, Technicien du Centre de Cryogénie du C.D.T.N., peut prêter une main forte dans ce domaine par sa compétence et même par des moyens (pièces de rechange, huile de lubrification, ...).

- Une recommandation assez particulière consiste en l'installation d'une colonne distillatrice liée au liquéfacteur d'air liquide. Cette colonne produit l'azote liquide qui sera utilisé dans différents domaines comme l'étude des phénomènes physiques à basse température (étude des comportements des matériaux, étude de l'échange thermique).

- La non disponibilité de certains appareils de mesure constitue une contrainte majeure à l'avancement de notre projet. Nous avons, à cet effet, veillé à ce que le cryostat possède des trous pour placer, en option, ces instruments dont nous souhaiterions que la commande soit approuvée :

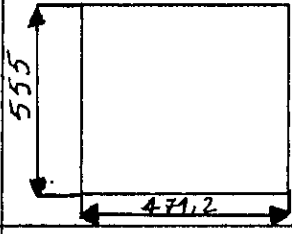
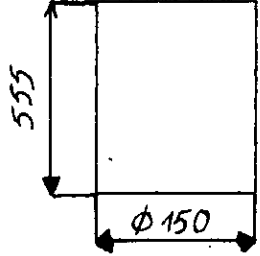
- * compteur à gaz cryogénique,
- * alimentation stable à faible courant électrique,
- * sondes pour mesures de température,
- * instrument de visualisation du profil de vitesse,
- * manomètre pour mesure du vide.

A la fin de ce travail, nous tenons à souligner que durant toute la période du déroulement de notre projet, nous avons acquis une somme importante de connaissance en cryogénie et nous avons mis en pratique notre formation théorique d'ingénieur mécanicien. A cet effet, nous souhaitons que la cryogénie, comme spécialité, prend sa place qui lui revient de droit dans notre école.

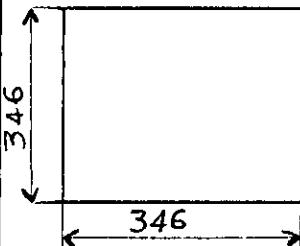
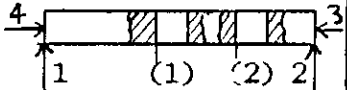
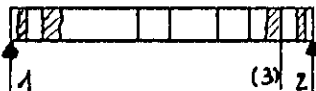
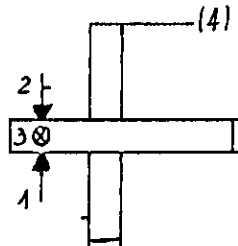
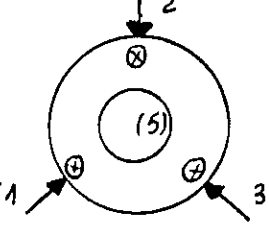
ANNEXE -I

- LES GAMMES D'USINAGE -

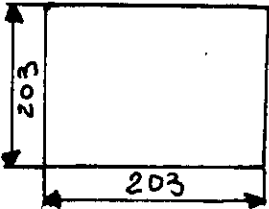
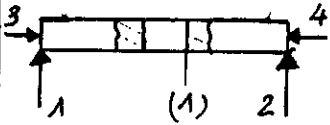
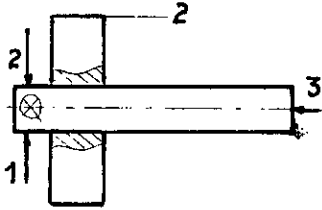
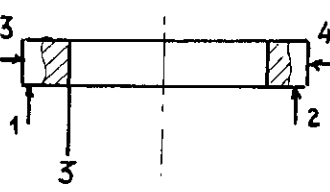
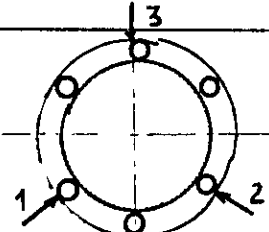
1 Cylindre interieur

N° des ph/sph	designation des phases	Machine utilise	Croquis	Outil	Contôle
100	Verifier les côtes de la tôle				réglet
200	Découpage découpé la tôle	guillotine			
300	Cintrage cintré la tôle	cintreuse			

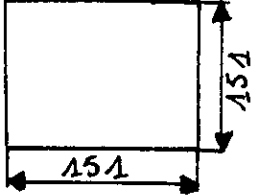
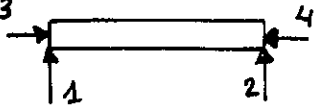
2 : Couvercle de cylindre extérieur (bride)

N° des ph/s.ph	Designation des phases	Mahine utilise	Croquis	outils	control
100	Verifier les côtes de la tôle				réglet
200	Découpage découpé la tôle pour approché du contour voulu	transen- euse			
300	PERCAGE Montage definit par: appui lineaire (1,2) appui ponctuels(3,4)	perçeuse manuelle et		foret à centrer foret 6 " 12 " 20	
310	percer (1) au ϕ 20	automati- que			
320	percer (2) au ϕ 20				
400	PERCAGE percer (3) au ϕ 8				
500	TOURNAGE Montage mixte	tour		outil à charioter	
510	charioter (4) au ϕ 343				
600	TOURNAGE Montage en l'air	tour		outil à aliser	ped à coulisse
610	alésér (5) au ϕ 150				

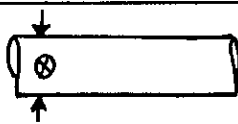
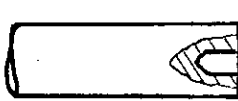
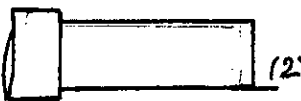
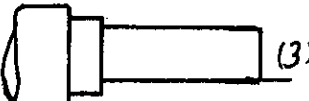

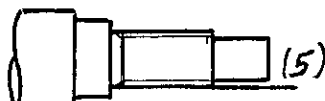

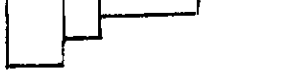
3: palier .

N° des ph/s ph	Desigation des phases	Machine utilise	croquis	Outil	Contôle
100	- Vérifier les côtes de la tôle				réglet
200	Découpage découpé la tôle pour approche du contour voulu	transeneuse			
300	PERCAGE Montage definit par: appui lineaire (1,2) appui ponctuels (3,4) percer (1) au ϕ 20	perceuse manuelle et automatique		foret à centrer foret 6 à 20	
400 410	Tournage Montage mixte chariote (2) au ϕ 200	Tour		outil à charioter	
500	FRAICAGE Montage definit par: appui lineaire (1,2) appui ponctuels (3,4) alser (3) au ϕ 150	fraiseuse		fraise à aliser	
600 610	Fraisage Montage en l'air perce 6 trous ϕ 6	fraiseuse (plateau diviseur)		foret 6	

4: fond

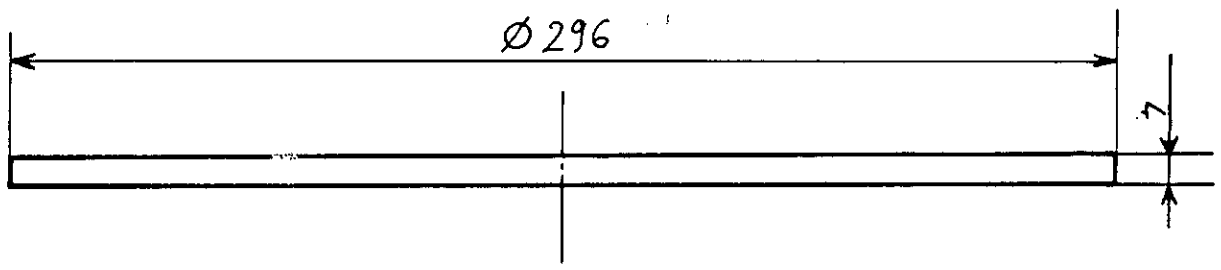
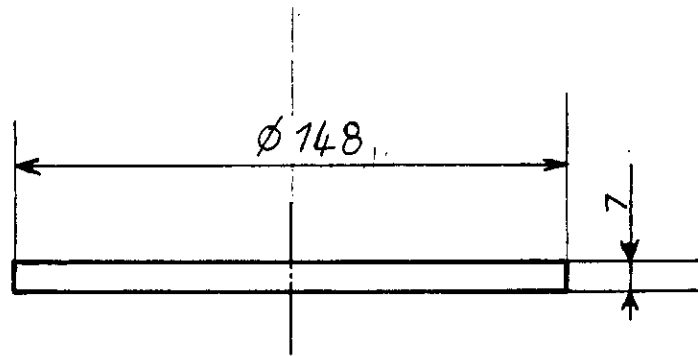
N° des ph/s ph	Desigation des phases	Machine utilise	croquis	Outil	Contôle
100	Contrôle de la tôle Verifier les cotes de la tole				règlet
200	Découpage découpé la tôle pour approche du contour voulu	transeneuse			
300	FRAISAGE Montage definit par: appui lineaire (1,2) appui ponctuels (3,4)	fraiseuse (plateau circulaire)		Fraise	

5: Support niveau :

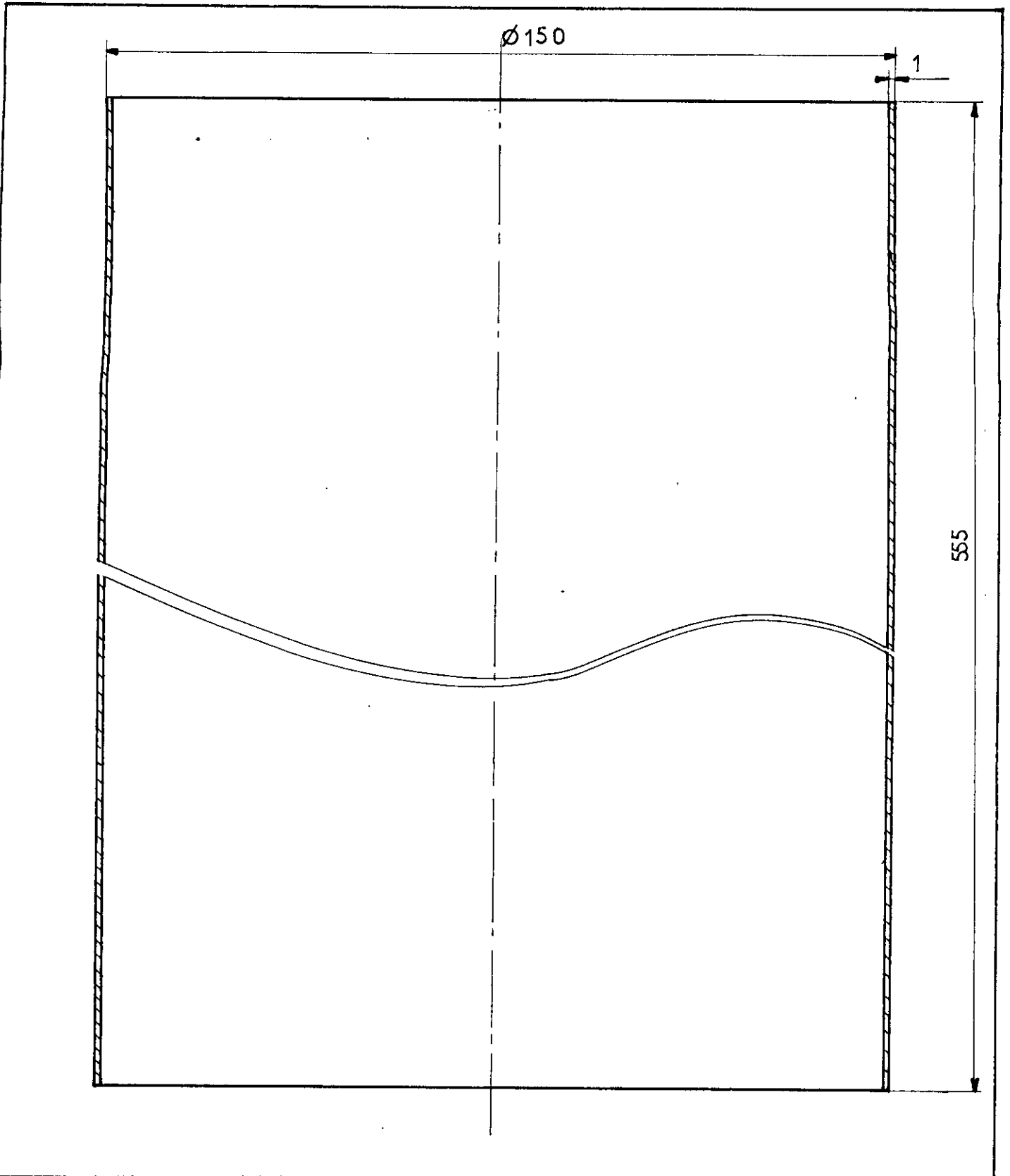
N° des ph/s ph	Desigation des phases	Machine utilise	croquis	Outil	Contôle
100	Contrôle du Brut Verifier si le Brut est capable de donner la piece demandée				Pied à coulisse
200	Tournage Montage mixte	tour "		foret à centrer	
210	Dresser et Centrer (1)			outil à	
220	charioter (2) au ϕ 20 sur 25			charioter	
230	charioter (3) au ϕ 18 sur 18			"	
240	charioter (4) au ϕ 11,6 sur 8			"	
250	fileter (5) M18 sur 18 sur 2,5			outil à fileter	
260	percer (6) au ϕ 3			foret 3	
270	transener 6			outil à transener	

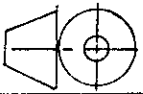
ANNEXE -II

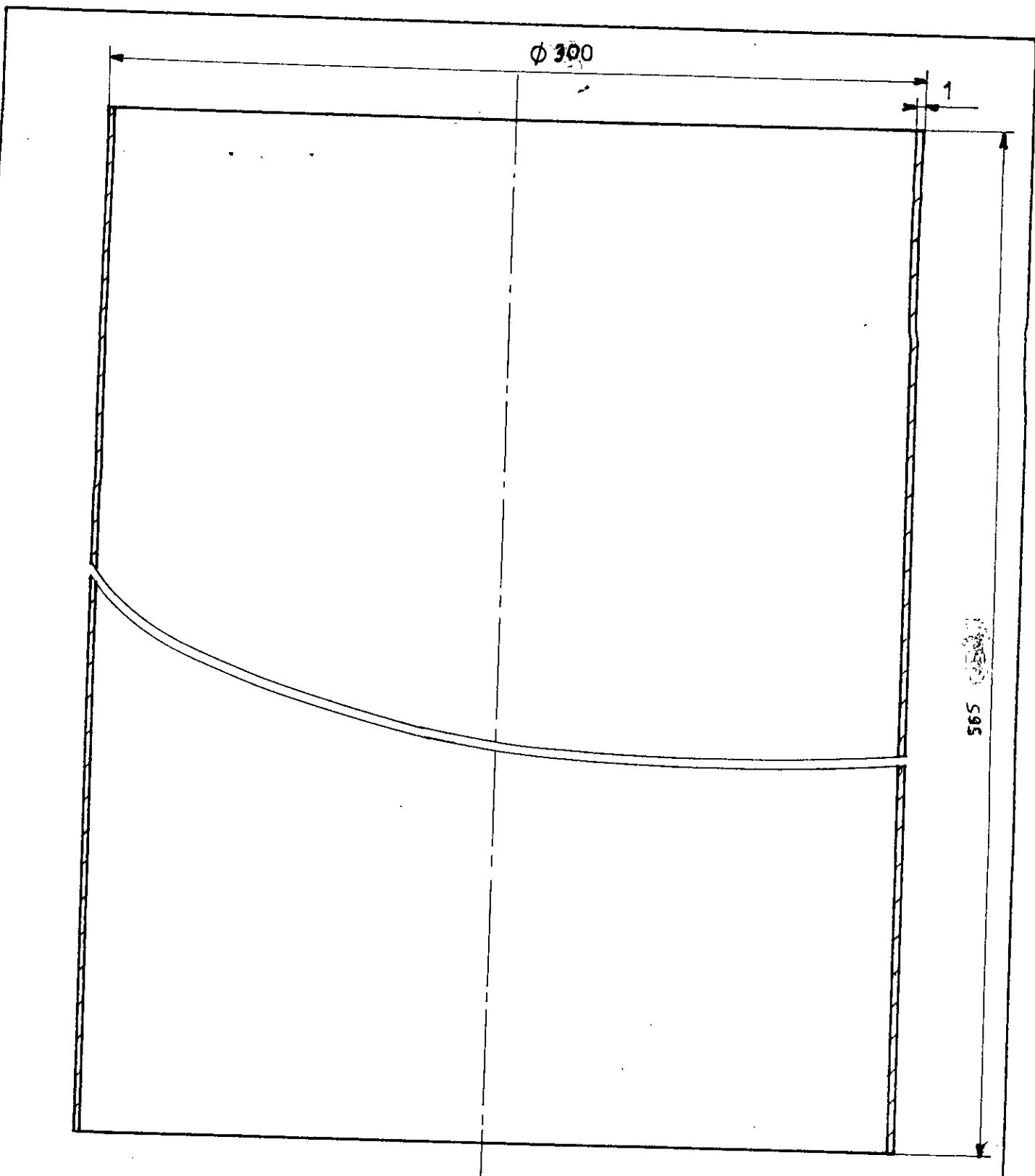
- LES DESSINS DE DEFINITIONS -



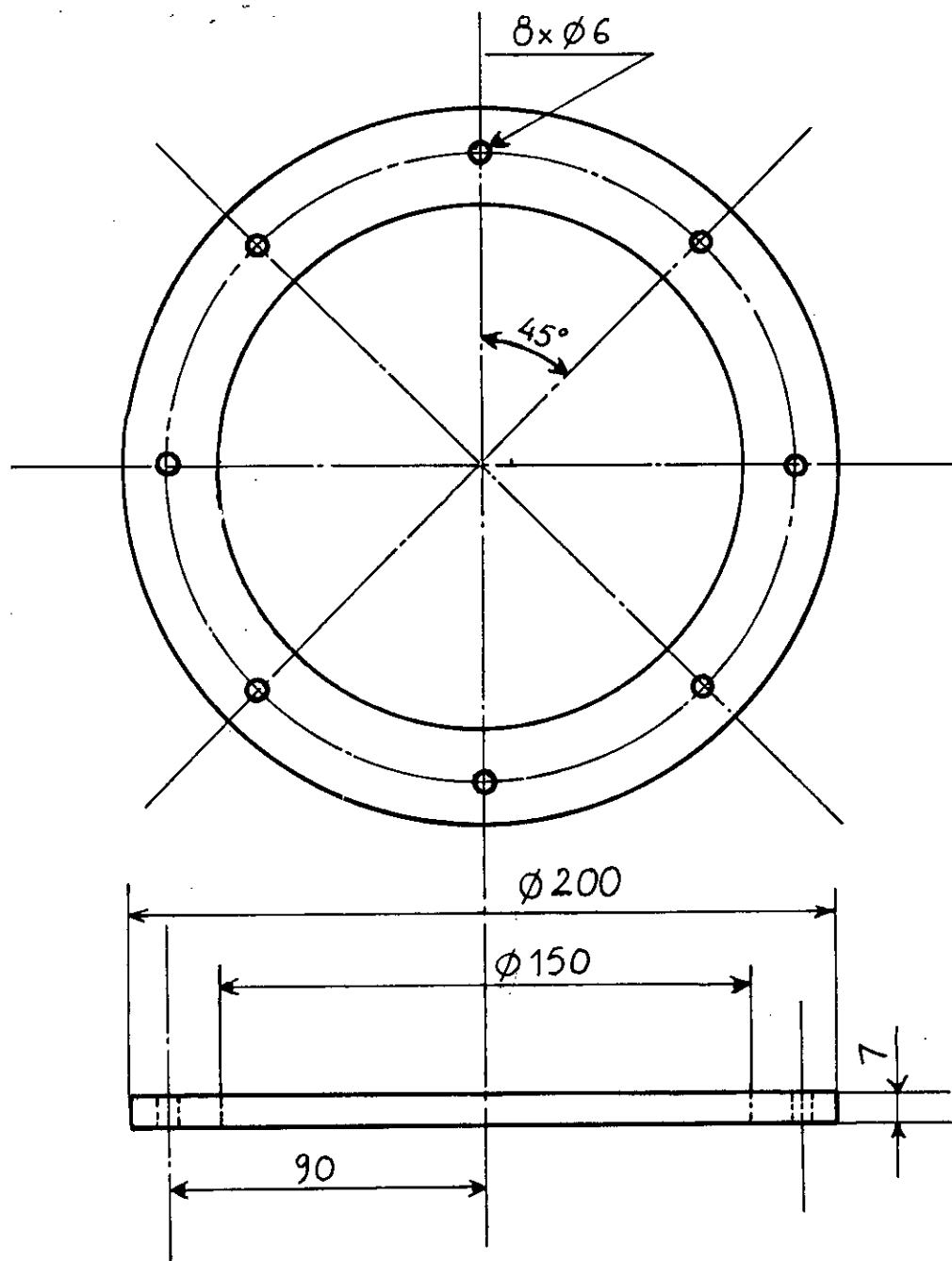
ECOLE		NATIONALE		POLYTECHNIQUE	
Echelle	Masse		<i>FONDS</i>	ENP	
Echelle	AITSAADA Benabdahmane			Dép.G.Mécanique	
Promoteur	KHEMIS GUERGUEB	CE 02			



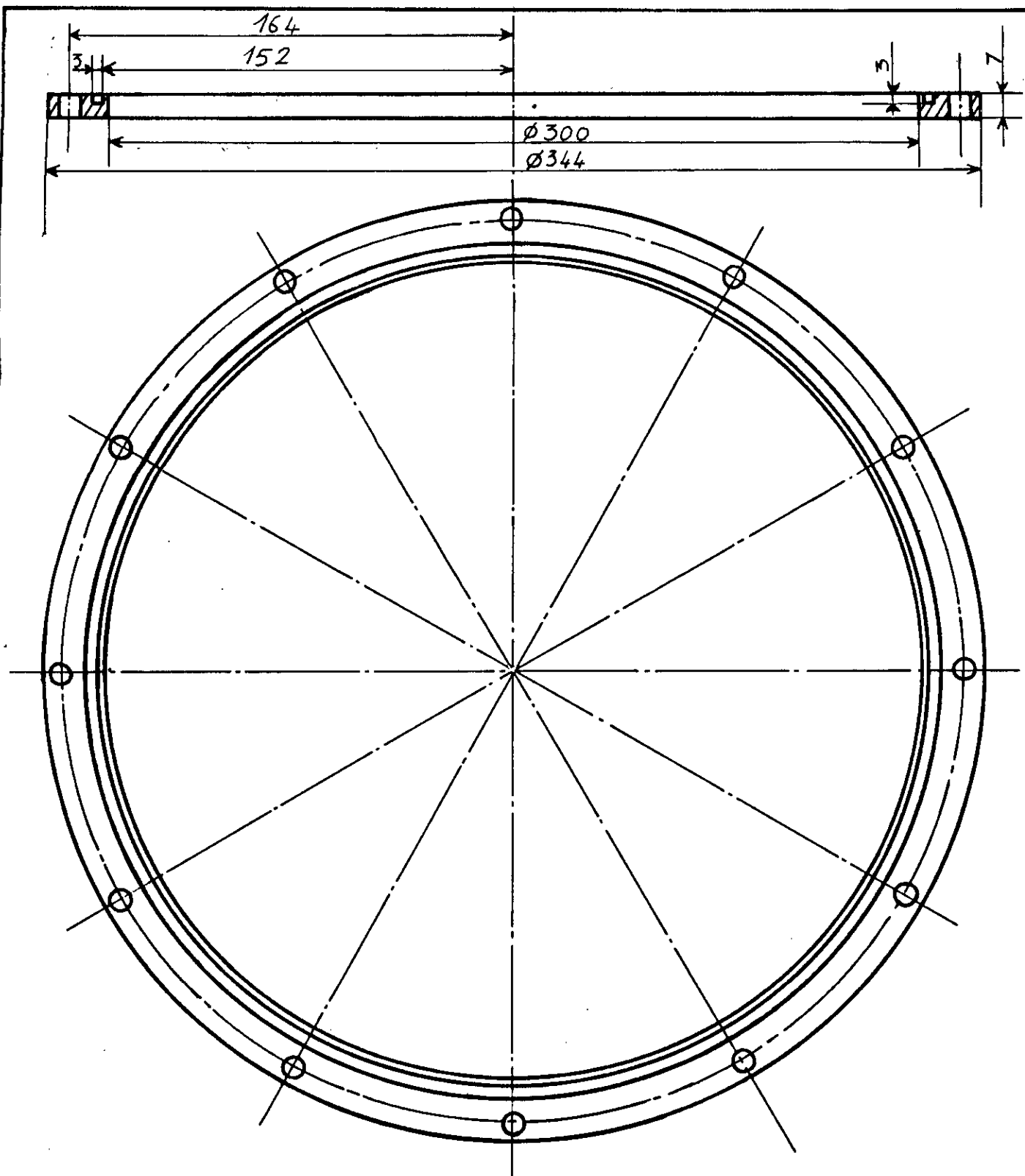
ECOLE			NATIONALE		POLYTECHNIQUE	
Echelle	Masse		<i>CYLINDRE INTERIEUR</i>		ENP Dep. G. Mécanique	
1:1						
Etudiants	AITSAADA					
	Benabderrahmane					
Promoteurs	GUERGUEB					
	KHEMIS				CE 03	



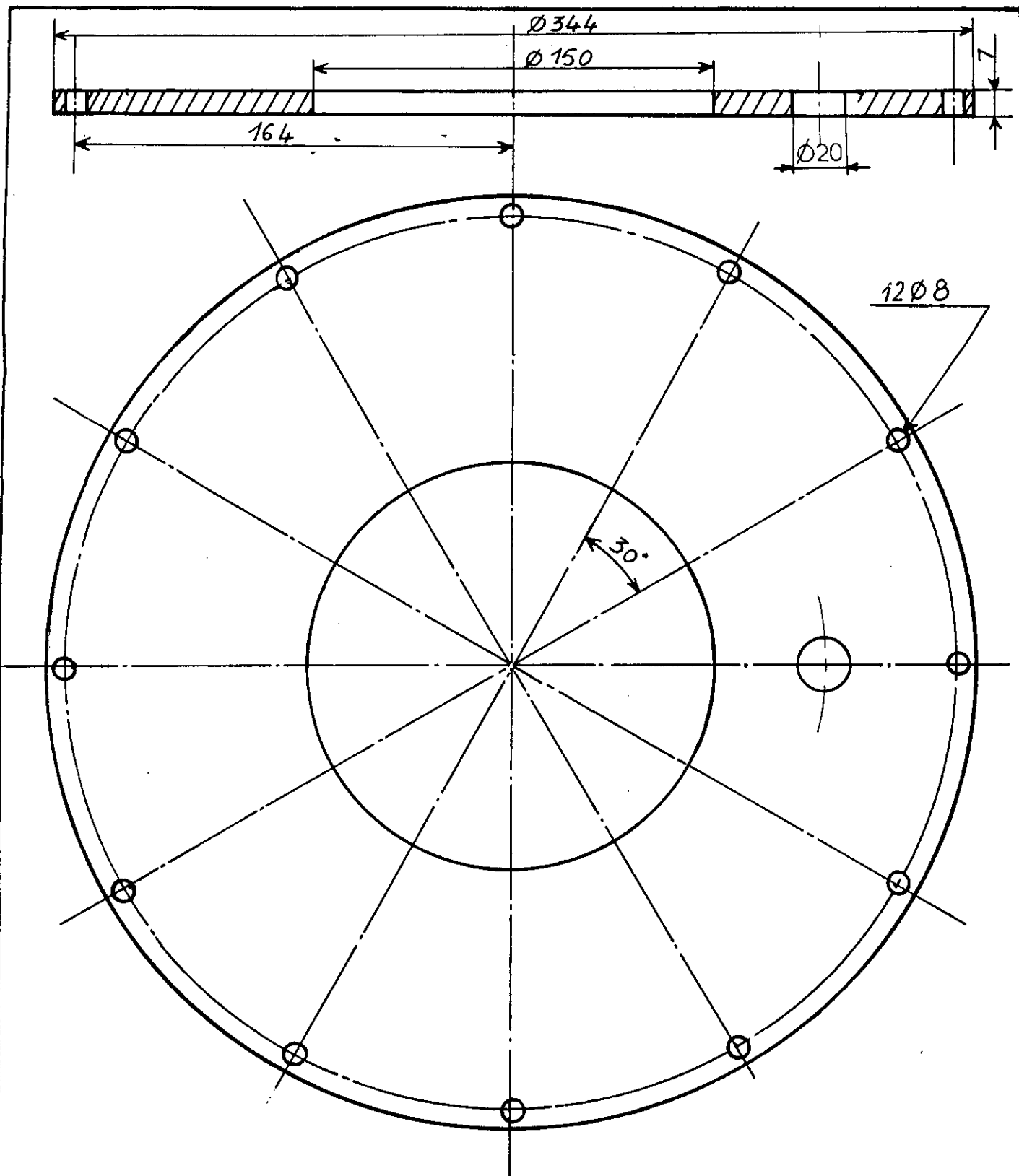
ECOLE		NATIONALE		POLYTECHNIQUE	
Echelle	Masse		CYLINDRE EXTERIEUR	ENP	
1:2				Dép. G. Mécanique	
Etudiants	AFT SAADA			CE 01	
	Benaberrahmane				
Promoteurs	GURGUEB				
	KHEMIS				



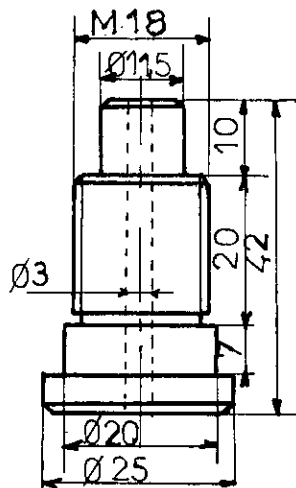
E COLE		NATIONALE		POLYTECHNIQUE	
Echelle	Masse		<i>PALIER DU CYLINDRE interieur</i>	ENP	
Etudiants	Benabderrahmane			Dép.G.Mécanique	
	AITSAADA				
Promoteurs	KHEMIS				
	GUERGUEB				CE 06



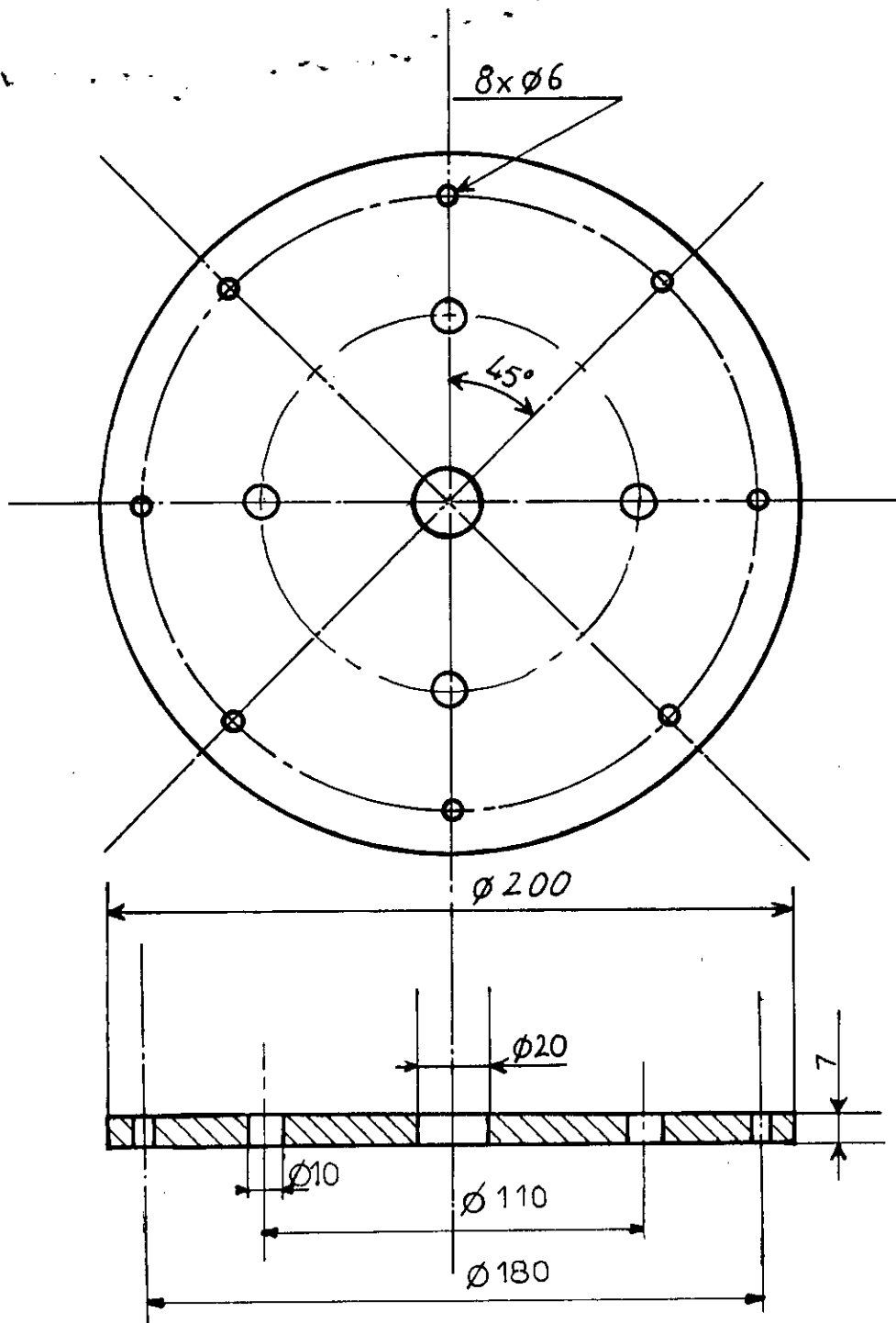
ECOLE		NATIONALE		POLYTECHNIQUE	
Echelle	Masse		<i>PALIER DU</i> <i>CYLINDRE</i> <i>exterieur.</i>	ENP	
1					
Etudiants	Benabderrahmane			Dép G Mécanique	
	AITSAADA				
Promoteur	KHEMIS				
	GUERGUE B			CE 07	



ECOLE		NATIONALE		POLYTECHNIQUE	
Echelle	Masse		Couvercle du cyl exterieur	ENP	
1:2				Dép.G.Mécanique	
Etudiants	AIT SAADA				
	Benabderrahmane				
Promoteur	KHEMIS				
	GUERGUEB			CE 08	



ECOLE		NATIONALE		POLYTECHNIQUE	
Echelle	Masse		Maintien du niveau	ENP	
1:1				Dép. G. Mécanique	
Etudiants	Ait SAADA Bera b d é r r a h m e n				
Promoteurs	HEMIS GUËRGUEB				
				CE 09	



ECOLE		NATIONALE		POLYTECHNIQUE	
Echelle	Masse		Couvercle du cyl interieur	ENP	
1:2				Dép. G. Mécanique	
Etudiants	AIT SAADA				
	Benabdetrahmane				
Promoteur	KHEMIS				
	GUERGUEB		CE 06		

- ANNEXE III -

- LES FORMULES UTILISEES -

1) Détermination de débit de vapeur m :

Le débit de vapeur m est le produit des différentes entrées de chaleur (par conduction dans le col, à travers les vapeurs d'azote et dans le vide résiduel et par rayonnement). La somme de ces trois derniers flux de chaleur est notée Q_r . le débit m est affecté d'un facteur de correction ($\rho_{liq}/(\rho_{liq} - \rho_{vap})$) qui est dû au fait qu'une partie du volume de vapeur, crée par la somme des flux de chaleur $Q_1 + Q_r$, occupe la place du volume vaporisé. Dans un laps de temps dt , il sort une masse $m dt$, du cryostat, le niveau de l'azote descend d'une distance dy .

Ainsi on a :

$$m dt = \rho_{liq} s dy - \rho_{vap} s dy$$

S : la surface transversal du bain,

$$m dt = (\rho_{liq} - \rho_{vap}) s dy$$

$$m = (\rho_{liq} - \rho_{vap}) V$$

V : débit volumique.

mais :

$$\left\{ \begin{array}{l} V = \frac{\text{debit effectivement évaporé}}{\rho_{liq}} = \frac{m_{eff}}{\rho_{liq}} \\ m_{eff} = \frac{Q_1 + Q_r}{H_v} \end{array} \right.$$

avec H_v : chaleur de vaporisation à 77 k

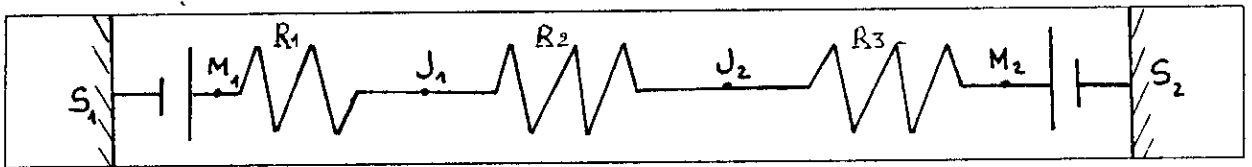
$$m = (1 - \frac{\rho_{vap}}{\rho_{liq}}) (Q_1 + Q_r) / H_v$$

on pose : $(1 - \rho_{vap}/\rho_{liq}) / H_v = \beta$

d'où : $m = \beta (Q_1 + Q_r)$

2) Flux de chaleur rayonné entre deux surfaces :

L'échange de chaleur par rayonnement entre deux surfaces grises, séparées par un milieu transparent, peut être schématisé par un réseau électrique où les potentiels représentent les émittances totales M et les radiosités J et où le courant électrique représente le flux de chaleur (voir fig N°1).



- ϵ_1, ϵ_2 : émissivité des corps 1 et 2 respectivement,
- F_{12} : Facteur de forme de la surface 1 vers la surface 2.
IL Dépend de la géométrie des surfaces,
- M_1, M_2 : émittance totale du corps 1 et 2 respectivement,
- J_1, J_2 : Radiosité du corps 1 et 2.

Ainsi le flux rayonné entre les 2 surfaces peut se calculer par :

$$Q_1 = F_{12} A_1 (M_1 - M_2) = F_{12} A_1 \sigma (T_1^4 - T_2^4)$$

avec :

σ : constante de Boltzman égale à $5,67 \cdot 10^{-12} \text{ W/cm}^2 \text{ K}^4$

D'après le principe : la résistance thermique équivalente est la somme des résistances thermiques en série R_1, R_2, R_3 on peut écrire :

$$\frac{1}{F_{12} A_1} = \frac{1 - \epsilon_1}{\epsilon_1 A_1} + \frac{1}{F_{12} A_1} + \frac{1 - \epsilon_2}{\epsilon_2 A_2}$$

* Si l'échange thermique par rayonnement se fait entre deux surfaces seulement, alors: $F_{12} = 1$

d'où :

$$F_{12} = \frac{\epsilon_1 \epsilon_2}{\epsilon_2 + \frac{A_1}{A_2} (1 - \epsilon_2) \epsilon_1}$$

* Dans les même condition, si on suppose que la surface du corps 2 est noire ($\epsilon_2 = 1$), alors on a :

3) Détermination de la conductivité thermique de l'air:

Le coefficient de conductivité thermique de l'air est déduit de la théorie de la cinétique du gaz, il est évalué à la température T moyenne égale à 188.5 k .

$$\bar{K} = \frac{1}{3} \rho \bar{V} L_p C_v$$

\bar{K}_{air} : conductivité thermique [w/cm k]

ρ : densité de l'air [g/cm³]

v : vitesse moyenne des particules [cm/s].

$$v = 14.551 \cdot 10^3 (T/M)^{1/2}$$

M : masse molaire de l'air égale à 29 g/mole.

L_p : libre parcours moyen des molécules égale à 0.2 cm

c_v : chaleur spécifique de l'air [J/g k]

Si nous supposons que l'air est un gaz parfait, on tire directement :

$$\rho = \frac{P}{R T} = \frac{4}{0.287 \cdot 188.5} = 7.39 \cdot 10^{-5} \text{ g/cm}^3$$

$$c_v = \frac{1}{\gamma - 1} R = \frac{1}{0.4} \cdot 0.287 = 0.7210^{-3} \text{ J/gk}$$

par la suite on peut calculer :

$$\bar{V} = 14.551 \cdot 10^3 \left(\frac{188.5}{29} \right)^{1/2} = 37.1 \cdot 10^3 \text{ cm/s}$$

$$\bar{K}_{air} = \frac{1}{3} \cdot 7.39 \cdot 10^{-5} \cdot 37.1 \cdot 10^3 \cdot 0.09 \cdot 0.72 \cdot 10^{-3} = 5.92 \cdot 10^{-5} \text{ W/cmK}$$

4) Le developpement des fonctions en serie :

$$T(x+\Delta x) = T(x) + \frac{\Delta x}{1} \frac{dT}{dx} + \frac{\Delta x^2}{2} \frac{d^2T}{dx^2} + \dots$$

$$T(x-\Delta x) = T(x) - \frac{\Delta x}{1} \frac{dT}{dx} + \frac{\Delta x^2}{2} \frac{d^2T}{dx^2} - \dots$$

$$\text{on a : } T(x+\Delta x) - T(x-\Delta x) = 2 \Delta x \frac{dT}{dx}$$

$$\frac{dT}{dx} = \frac{T(x+\Delta x) - T(x-\Delta x)}{2 \Delta x}$$

aussi

$$T(x+\Delta x) + T(x-\Delta x) = 2 T(x) + \Delta x^2 \frac{d^2T}{dx^2}$$

$$\text{soit } \frac{d^2T}{dx^2} = \frac{T(x+\Delta x) + T(x-\Delta x) - 2 T(x)}{\Delta x^2}$$

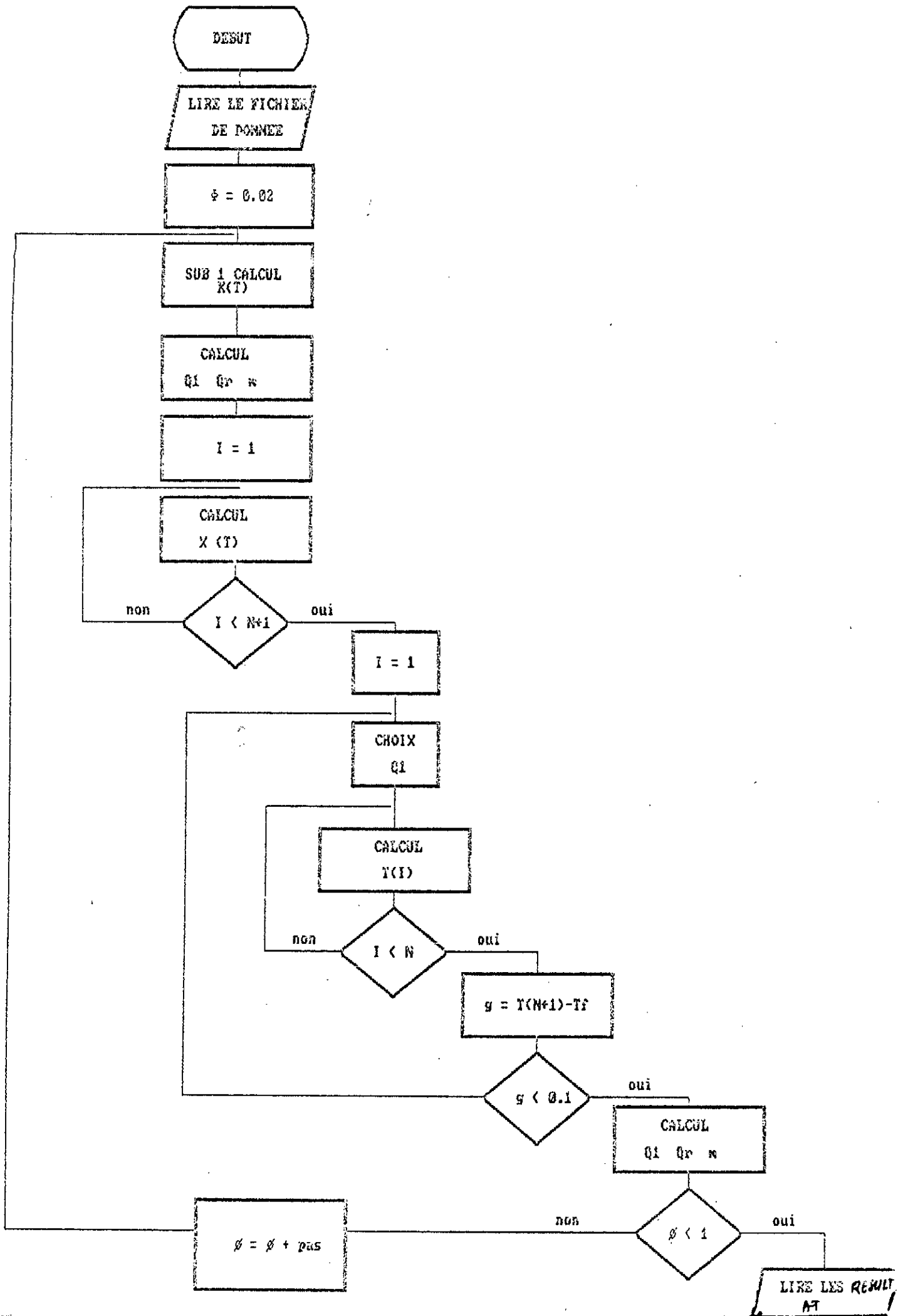
Si on descritise le col de longueur L et de section latérale A en N parties égales, Δx est obtenu par L/N.

On peut écrire :

$$\frac{T_{i+1} + T_{i-1} - 2T_i}{\Delta x^2} = \frac{2}{\Delta x} \left(\frac{T_{i+1} - T_{i-1}}{2\Delta x} \right) + \frac{2(T_{i-1} - T_i)}{\Delta x^2}$$

- ANNEXE IV -

- ORGANIGRAMME -



BIBLIOGRAPHIE

- [1] R.R. Conte " Element de cryogénie " Masson & Cie
édition 1970
- [2] Stéfan Buhler " La Technologie Cryogenique "
Institut de physique nucléaire Orsay
- [3] Philips " Cryogénérateur " H.C.R
- [4] L'Air Liquide " Encyclopédie des gaz " H.C.R
- [5] Jean Le Mounier " Installation cryogénique "
Technique de L'Ingénieur (B566)
- [6] M.S.ISLAM & R.G Scurlock
" Qualitative details of the complex flow in cryogenic
vapour columns " Cryogenic.December 1977
PP. 655 - 660
- [7] P.Poupeau & P.Boupard " Technique du vide "
Techique de L'Ingénieur (T5107) édition 1981
- [8] Schmilt Jürgen "Mecanique des fluides"
O.P.U (1993)
- [9] Schmilt jürgen " Transmission de chaleur "
O.P.U (1993)
- [10] Kreith "Transmission de chaleur & Thermodynamique"
Masson & Cie (1967)
- [11] J.F.Sacadura "Initiation aux transferts thermique"
Pairs : Technique et documentation
(1982)
- [12] S.Benissaad " Le soudage " Universite de constantine
I.G.M (O.P.U)