

institut de physique nucléaire

LABORATOIRE ASSOCIE A L'IN2P3



IPNO 85-03

A.S.S.O.

AIMANT SUPRACONDUCTEUR POUR SPECTROSCOPIE OPTIQUE

G. LEVY - S. BUHLER

UNIVERSITÉ PARIS-SUD

I.P.N. BP n° 1 - 91406 ORSAY

IPNO 85-03

A.S.S.O.

AIMANT SUPRACONDUCTEUR POUR SPECTROSCOPIE OPTIQUE

G. LEVY - S. BUHLER

Cet ensemble a été réalisé avec la participation de :

- G. POUILLON, G. ROGER pour l'étude et les dessins du cryostat et de son support.
- M.F. KUBICA, le Service de MECANIQUE (R. RASPILLER) pour la fabrication des pièces.
- M. DUTFOY, F. HUON pour la chaudronnerie et la tuyauterie.
- C. PAHOUR pour l'étude, aidé de M. MONTOYA pour la réalisation de l' électronique de commande et de contrôle.
- M. ARIANER pour les notices techniques.
- M. KOVALSKI pour le bobinage, les montages, les essais.

INTRODUCTION

Destiné à la spectroscopie optique, cet ensemble permet l'observation de la levée de dégénérescence, par effet Zeemann, des raies d'absorption de monocristaux d'halogénures de Thorium dopés avec des éléments 5f (Pa, U, Np, Pu).

Les spécifications demandées étaient les suivantes :

L'axe de l'induction magnétique est horizontal. L'échantillon (1 cm x 1 cm x 1 mm) enfermé dans son tube de quartz est introduit par le haut dans le bain d'hélium liquide. Il peut ainsi, par rotation, avoir ses grandes faces perpendiculaires ou parallèles aux lignes d'induction. Dans le plan horizontal, le faisceau de lumière principal est parallèle à l'axe magnétique, le faisceau secondaire (laser) lui est perpendiculaire.

- diamètre principal libre..... 35 mm
- diamètre secondaire libre..... 20 mm
- diamètre d'introduction de l'échantillon... 20 mm
- induction centrale minimum..... 6 T
- homogénéité..... quelques % dans le volume de l'échantillon.

L'aimant travaille en mode persistant (utilisation d'un interrupteur supraconducteur) permettant une économie de la consommation d'hélium liquide et l'utilisation d'une alimentation simplement filtrée.

Le bain de LHe pourra être refroidi à 2, 2° K (point λ)

Il n'y a pas de blindage magnétique.

1 - L'AIMANT

Le besoin d'avoir un espace libre pour l'introduction de l'échantillon perpendiculairement à l'axe magnétique, ainsi que l'utilisation d'un faisceau de lumière annexe, implique que le champ soit engendré par une paire de bobines montées en configuration de Helmholtz (figure 1).

Les choix des dimensions des bobines et de la section du fil supraconducteur à utiliser ont été dictés par :

- a) l'obtention d'une homogénéité à 1 % près sur un volume sphérique d'environ 1 cm³.
- b) assurer que, lors d'une transition de l'état supraconducteur vers l'état normal, la température des bobines ne dépasse pas environ 90° K de façon à éviter des contraintes thermiques trop importantes dans le bobinage et le mandrin.

1 - 1 Le conducteur utilisé

Composite multifilamentaire VAC (Vacuumschmelze) Vactory flux 5001 type F 60/0,75

- diamètre nu 0,75 mm
- diamètre isolé (formvar) 0,8 ± 0,015 mm

rapport cuivre/supra	1,4/1
filaments supraconducteurs	en Niobium - Titane
diamètre	63 μ m
nombre	60
pas de torsion	20 mm
rapport de résistivité résiduelle de la matrice cuivre R 300°K/ R 10°K	> 100
courant critique à 4,2°K / 8T	185 A

1 - 2 Caractéristiques de l'aimant (figure 2)

Les deux bobines présentent de très légères différences de construction dues aux variations du diamètre du fil. L'enroulement est réalisé compact. De plus il n'y a pas d'intercalaire entre chaque couche si bien que la couche suivante s'encastre dans la couche précédente (fil rond et comporte une spire en plus ou en moins.

rayon intérieur	23,2 mm
rayon extérieur	Bobine A 89,35 mm
	Bobine B 89,00 mm
Espace entre bobines	40 mm
largeur de 1 bobine	49 mm
longueur totale	138 mm
nombre de spires par couche	59 ou 60
nombre de couches	Bobine A 92
	Bobine B 91
nombre de spires par	
	Bobine A 5466
	Bobine B 5454
Inductance totale	5,012 henrys
Courant nominal	110 A
Energie magnétique stockée	30,3 KJ
Induction magnétique centrale	6,33 T
Induction maximale sur le conducteur	8,36 T
Longueur de fil par bobine	environ 1940 m
Résistance à 300° K	A 128,8 Ω
	B 117,3 Ω
poids des 2 bobines et du mandrin inox	environ 35 daN

Le mandrin est isolé ; au centre avec 2 couches de mylar de 100 μ m d'épaisseur, et sur les côtés avec de la fibre de verre epoxy de

5 mm d'épaisseur rainurée radialement de façon à améliorer le mouillage des bobines.

Le bobinage est imprégné avec de la résine epoxy SCOTCHCAST 3 M type 252, thyxotrope, rigide après cuisson (pour polymérisation complète pendant 20 heures à 75° C.

1 - 3 L'induction magnétique

L'induction magnétique nominale au centre de ASSO s'élève à 6,33 Teslas. Les figures 3 et 4 montrent les variations de B_z à $R = 0$ ou à $Z = 0$.

La figure 5 montre les zones d'homogénéité. On peut ainsi constater que l'induction au centre reste constante à $\pm 1\%$ près dans un volume cylindrique de 11 mm de longueur et 15 mm de diamètre.

L'induction maximale sur le conducteur vaut 8,36 Teslas pour la composante axiale B_z à peu près dans le plan d'une bobine et pour le rayon intérieur (composante radiale B_r pratiquement nulle à cet endroit).(figure 6)

La composante radiale maximale, moins gênante pour les contraintes mécanique sur le fil, atteint 3,15 Teslas sur les faces extérieures des bobines à peu près au rayon moyen.

Comme il n'y a pas de blindage extérieur, le champ de fuite s'étend relativement loin, puisqu'il faut, sur l'axe magnétique, aller jusqu'à 1,55 m de l'enveloppe extérieure du cryostat pour ne plus avoir que 5 gauss (figure 7).

1 - 4 Point de fonctionnement à 4,2° K

La figure 8 montre :

- La caractéristique (I_c , B) à 4,2° K
- Les droites de charge :
 - a) celle au centre de l'aimant pour l'utilisateur, soit une constante magnétique de 17,38 A/T (ou 0,0575 T/A).
 - b) celle du point du bobinage où l'induction est maximum avec le courant nominal (110 A). Le point de fonctionnement correspond à 96 % du courant critique à 4,2° K.

1 - 5 Température critique

La figure 9 montre dans l'espace affine (I_c , B_c , T_c) l'élévation possible de la température de la bobine sans provoquer de transition.

Le point courant du champ maximum sur le conducteur se déplace, dans le plan $T_c = 4,2^\circ K$, sur la droite OM ($M = 110 A/8,36 T$). Compte tenu des relations quasi linéaires, dans le domaine considéré, entre la température critique et le champ critique d'une part, et avec le courant critique d'autre part, on peut déterminer la température critique que peut supporter le fil parcouru par le courant nominal et entouré par l'induction maximum. La valeur de celle-ci étant élevée, la température critique du fil (4,53° K) est assez proche de la température du bain (4,2° K) soit une excursion de 0,33° K seulement.

La possibilité de refroidir le bain de LHe à une valeur plus basse augmente notablement le confort de fonctionnement.

1 - 6 Protection des bobines

La protection de l'aimant, lors d'une transition éventuelle, contre les montées en température pouvant l'endommager, est réalisée par décharge rapide de l'énergie magnétique dans une résistance R_p branchée en parallèle. (figure 10)

Durant une décharge de l'aimant provoquée par l'apparition d'une zone résistive, le conducteur s'échauffe par effet joule, la température maximum étant atteinte à la fin de la décharge au point initial de la transition. Dans des conditions que l'on peut considérer comme adiabatiques la température maximum T_{MAX} est donnée par :

$$\int_{T_0}^{T_{MAX}} C(T) \cdot dt = \int_0^{\infty} \rho(T) \cdot j^2 \cdot dt$$

avec t = temps ; T = température

j = densité de courant

$C(T)$ et $\rho(T)$ = chaleur spécifique et résistivité fonctions de la température.

En réalité, le courant ne décroît pas exponentiellement, mais plus rapidement, car, à la charge constante R_p s'ajoute la résistance de la partie de la bobine devenue normale et croissant avec la température.

L'utilisation du programme de calcul QUENCH indique, dans le cas le plus défavorable où la bobine est court-circuitée sur elle-même (interrupteur supraconducteur "fermé", alimentation non débranchée), que celle-ci devient complètement normale au bout de 0,25 sec. La valeur du courant est complètement annulée au bout de 2,2 sec, la température maximum atteinte est de 87° K, l'énergie magnétique étant évidemment entièrement transformée en énergie calorifique, laquelle s'évacue par vaporisation de l'hélium liquide contenu dans le cryostat.

La valeur choisie pour la résistance de protection (4,5 Ω) permet de limiter la d.d.p aux bornes de l'aimant à 500 volts en début de décharge (si l'alimentation est débranchée et l'interrupteur "ouvert")

1 - 7 - 1 L'interrupteur supraconducteur

C'est un objet constitué d'un fil de Niobium-Titane accolé à un fil résistif servant de chaufferette, le tout étant enfermé dans un boîtier relativement étanche thermiquement.

Lorsque la chaufferette ne fonctionne pas, par conduction thermique, l'hélium liquide refroidit le fil de Nb-Ti qui passe à l'état supraconducteur : l'interrupteur est "fermé". Dans le cas contraire, la puissance délivrée au fil de chauffage fait monter la température interne du boîtier à une valeur supérieure à 10°K : le Nb-Ti passe à l'état normal, sa résistance devient très importante : l'interrupteur est "ouvert".

Destiné à court-circuiter les bobines supraconductrices sur elles-mêmes, l'interrupteur est étudié pour :

...

- 1) Transiter très vite de l'état supraconducteur à l'état normal. Cette vitesse de transition est primordiale pour éviter sa destruction par fusion si sa résistance mettait trop longtemps à croître. Pour cela on utilise du niobium-titane entouré de cupro-nickel.
- 2) Avoir une fois "ouvert" une valeur de résistance grande vis-à-vis de la résistance de protection. Lors d'une décharge, l'énergie magnétique se répartit entre l'interrupteur "ouvert" et R_p . L'énergie emmagasinée par celui-là l'échauffe et le volume de cupro-nickel-est calculé pour limiter cet échauffement à environ 100°K maximum.
- 3) offrir une impédance la plus faible possible par rapport à celles des bobines principales et de la résistance de protection. Il est donc bobiné d'une manière aselfique.

Pour des raisons de stabilité du passage du courant dans le Nb-Ti entouré de Cu-Ni, les fils composites servant à la fabrication des interrupteurs n'existent qu'en 0,2 ou 0,3 mm de diamètre. On doit donc fabriquer un câble de plusieurs fils en parallèle pour passer l'intensité désirée.

Le câble de l'interrupteur ASSO est constitué de 9 brins (3 x 3) de 0,3 mm de diamètre, torsadés (pour minimiser les effets inductifs).

1er triplet : pas de torsion = 18 mm

2ème triplet : " " " 30 mm

La figure 11 donne les courbes de courant critique dans un brin indépendamment et dans un brin du câble. La réduction importante de I_c est due aux contraintes mécaniques subies par le fil lors de la fabrication du câble.

1 - 7 - 2 Caractéristiques de l'interrupteur

Fini, il se présente comme un disque épais (40 mm), de diamètre extérieur 116 mm, et percé d'un trou au milieu (\varnothing 26,5 mm). Il est monté sur le dessus de l'aimant (figure 12).

a) bobinage	rayon intérieur	39 mm
	rayon extérieur	53 mm
	épaisseur	20 mm
	diamètre du câble supraconducteur isolé	1,45 mm
	nombre de doubles spires par couches	6
	nombre de couches	23
	longueur du câble	62,5 m
	résistance du câble à 300°K	36 Ω
b) chauffage :	fil constantan de diamètre	0,63 mm
	résistance	6,8 Ω

Il faut fournir 2, 93 W de puissance de chauffage pour faire basculer l'interrupteur de l'état supraconducteur ("fermé") à l'état résistif ("ouvert").

1 - 8 La résistance de protection

De façon à réaliser un bloc compact avec les bobines et l'interrupteur, et parce que la faible valeur de l'énergie magnétique stockée le permet, la résistance de protection est logée autour de l'interrupteur dans l'hélium liquide (figure 12). Elle est constituée de 22 m de fil de constantan de 1,6 mm de diamètre donnant approximativement une valeur de 4,5 ohms à 4,2°K.

1 - 9 Les contraintes

1-9-1 Contraintes de bobinage

Afin d'assurer une bonne tenue mécanique du conducteur la tension de bobinage a été maintenue à 3 daN, ce qui correspond à une contrainte maximale dans le fil de 60 MPa (6 Kgf/mm²). Dans le plan médian de la bobine, le mandrin subit alors une contrainte de compression tangentielle variant de 251 à 196 MPa suivant le rayon.

1 - 9 - 2 Contraintes thermiques (mise en froid)

La contraction différentielle du mandrin en acier inox et du bobinage ($\epsilon_{\text{inox}} = 3.10^{-3}$; $\epsilon_{\text{fil}} = 2,9.10^{-3}$) modifie légèrement, en les atténuant, les contraintes établies précédemment. A froid et sans courant les contraintes maximales tangentielles dans le mandrin et dans le fil sont respectivement de 235 et 60 MPa.

1 - 9 - 3 Contraintes électromagnétiques

L'induction magnétique engendrée par la courant fait :

- radialement augmenter le diamètre des spires, ce qui se traduit par une augmentation de tension dans le fil et par un relâchement de la compression dans le mandrin.
- axialement attirer les bobines entre elles avec une force de 8600 daN (figure 13), ce qui se traduit par une pression maximale sur les flasques internes de 4 MPa (40 daN/cm²).

1 - 9 - 4 résultats globaux

La figure 14 donne le tableau récapitulatif des contraintes tangentielles dans le plan médian d'une bobine, ainsi que les déflexions radiales partielles et totales. Pour le calcul de ce rétreint, on admet qu'il n'y a pas de compression radiale des différents matériaux, hypothèse bien vérifiée dans la pratique pour les valeurs habituelles des rayons et des épaisseurs, ce qui permet une simplification importante des équations de l'élasticité.

On voit sur le tableau que la contrainte de tension maximum du fil est de 75 MPa bien inférieure à la limite élastique du fil estimée à 180 MPa. Les bobines n'ont donc pas été frettées, mais seulement entrâînées pour éviter tout mouvement du fil sous l'action des forces électromagnétiques.

1 - 9 - 5 Contraintes sur l'écran en cuivre

Toute variation de l'induction magnétique engendre des courants de Foucauld, dans les différents cylindres à l'intérieur ou entourant le champ. Il y a alors création de contraintes tangentielles qui

peuvent éventuellement être importantes, notamment dans l'écran en cuivre (à cause de sa bonne conductivité électrique), s'il n'est pas fendu longitudinalement pour arrêter les courants de Foucauld. Dans cette hypothèse, la vitesse de variation maximum du courant (200 A/sec) a lieu lors d'une transition (les bobines se déchargeant sur la résistance de protection, ce qui se traduit au niveau de l'écran par une vitesse de 1,3 T/sec engendrant une contrainte tangentielle maximum de + 4,6 MPa (tension).

Le cuivre ayant une limite élastique de 180 MPa, l'écran n'a pas été fendu, ce qui lui confère une bonne rigidité mécanique.

1. COMPOSITION DU CRYOSYSTEME "ASSO"

Le cryosystème est un ensemble de plusieurs modules dont chacun a une fonction précise. La figure 2.1 présente cette architecture pour le cas de "ASSO".

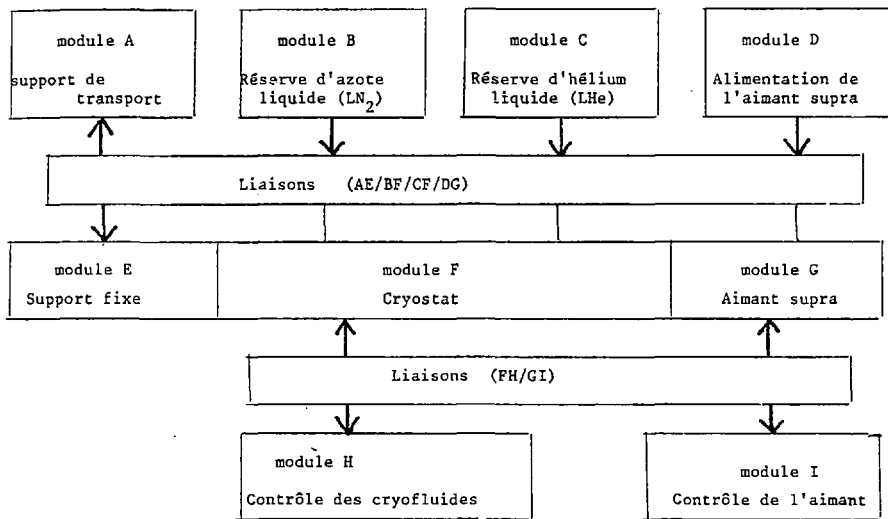


Fig. 2.1 : L'architecture du cryosystème "ASSO"

La Fig. 2.2 présente un schéma général des constituants cryogéniques et de leurs liaisons avec les repères des divers composants (vannes, soupapes, manomètres, etc.) qui sont répertoriés dans la légende annexe.

2. DESCRIPTIF DES MODULES CONSTITUTIFS

2.0 Support fixe et système de manutention

La figure 2.3 montre l'implantation du cryostat sur le site expérimental. Compte tenu des exigences locales (axe optique prédéterminé, faible hauteur sous plafond) et des impératifs cryogéniques (introduction de la canne de transfert, changement de canne de mesure avec l'échantillon), un dispositif de levage et de translation jusqu'au support fixe a été réalisé qui autorise une manutention aisée et en toute sécurité.

2.1 Support de transport

Le support de transport est constitué d'un châssis tubulaire équipé de roulettes. Le cryostat y est suspendu à travers son support de positionnement qui est solidaire avec l'encovinte du cryostat et qui définit sa position précise dans le support fixe du site expérimental. Le support de positionnement repose sur 4 amortisseurs en caoutchouc qui encaissent les trépidations du transport et des déplacements et évite ainsi un flambage du col tubulaire à paroi mince du cryostat par les efforts d'inertie exercés par la masse de l'ensemble aimant suspendu à son extrémité.

2.2 Réserve d'azote liquide (LN₂)

L'azote liquide nécessaire au refroidissement de l'écran 80K est stockée dans un réservoir de transport de 130 l sur le site de la manip.

Ce conteneur est équipé (voir fig. 2.2) des accessoires suivants :

- vanne de soutirage d'LN₂ V₁ raccordée à un flexible inox isolé sous mousse Armaflex servant au remplissage du réservoir de garde d'LN₂ du cryostat.
- vanne de dégazage V₂, normalement fermée pendant l'exploitation, permettant une pressurisation ou dépressurisation du conteneur.
- une soupape de sécurité S₁ tarée à 0,5 bar qui limite la montée en pression du conteneur par l'évaporation naturelle du cryofluide stocké.
- un indicateur du niveau de liquide contenu, du type à flotteur compensé.

2.3 Réserve d'hélium liquide (LHe)

Le conteneur de transport et de stockage pour LHe type l'Air Liquide RS 100A (figure 2.4) muni de roulettes à demeure comporte les accessoires suivants :

Equipements de la sortie de col à savoir :

- un robinet de dégazage V₃
- un manovacuomètre
- une soupape de transport (tarage 6 mbar) S₂ avec son robinet d'isolement V₄
- une soupape de sécurité avec décharge dans l'atmosphère S₃ (tarage 0,5 bar)
- une capacité anti-oscillatoire pour amortir d'éventuelles oscillations thermo-acoustiques (dites "de Taconis")
- un embout mâle auto-obtuteur genre Staubli pour le raccordement du tube de liaison vers le panneau de pressurisation et la récupération.

Tête de bouteille (plan B.T. réf. 40.80) montée sur un raccord Pneurop DN 50 kF et qui comporte :

- un presse-étoupe Ø passage 12 avec joint à lèvres en téflon, écrou avec fourreau de maintien, bouchon obturateur pour recevoir la canne de transfert.
- un presse-étoupe Ø passage 3 avec joint torique permettant l'introduction d'une jauge de niveau d'LHe.
- une tubulure verticale taraudée 1/8" gaz destinée à recevoir une jauge de niveau à demeure (actuellement non équipée).
- une embase électrique 4 broches étanche pour alimenter une chaufferette immergée dans LHe. La puissance dissipée est de 90 W sous 24 V, mais l'alimentation de la chaufferette passe en série par une petite bobine de fil supraconducteur. (résistance nulle à 4 K, mais env. 300 ohms en état normal), ce qui limite la puissance dissipée dans un conteneur exempt d'LHe à 2 W environ.

Ligne de transfert pour LHe composée de :

- une canne plongeante (plan B.T. 40.00.70) avec vanne cryogénique à commande manuelle ou pneumatique et sortie en raccord bayonnet femelle Pneurop DN 25 kF.
- une prolongation flexible avec canne plongeante pour le cryostat (plan B.T.40.78) avec raccord bayonnet mâle DN 25 kF et munie d'un embout auto-obturateur (en position non raccordée) qui empêche un resiphonnage en arrière de LHe dans le cryostat.
- un embout tubulaire DN 25 kF borgne servant de protecteur à la partie mâle du raccord bayonnet (fragile !) et assurant une étanchéité rigoureuse à l'extrémité éventuellement libre de la prolongation.

2.4. Cryostat :

Le cryostat conforme aux plans B.T. 43.25-1/2 et 2/2 est du type classique à garde d'azote liquide. Quelques caractéristiques essentielles pour l'utilisateur (géométrie, masses, contenance en cryofluides) sont présentées en Fig 2.5.

La partie inférieure du réservoir d'LHe contient l'aimant supra, son interrupteur et sa résistance de décharge. Deux passages optiques sont aménagés dans un plan horizontal passant par le centre de l'aimant pour les besoins des expérimentateurs.

La partie supérieure du réservoir constitue un volume de garde d'LHe. En exploitation le niveau du liquide y évolue entre un minimum et un maximum (2 sondes ponctuelles) complété périodiquement par un apport d'LHe de la réserve extérieure. La canne de transfert débouche alors au-dessus du niveau maxi mais en régime de mise en froid elle est enfoncée dans un réceptacle qui amène le cryofluide en-dessous de l'aimant supra pour une utilisation optimale des vapeurs froides.

Un dispositif particulier, dit bain à gradient, permet de travailler avec une température voisine de 2,2 K au niveau de l'aimant tout en maintenant LHe à la surface du réservoir de garde à 4,2 K et donc à pression atmosphérique. Ce sous-refroidissement de LHe est obtenu grâce à un volume cylindrique en cuivre, le bain pompé, immergé dans la profondeur du bain principal. Ce volume est alimenté en LHe à travers une petite vanne cryogénique V_{15} (Fig. 2.2) et pompé en permanence à travers un conduit spécial qui traverse le réservoir de garde et le col du cryostat.

Le mode d'exploitation de l'aimant en courant piégé justifie des descentes de courant largement sous-optimisées. Elles sont constituées, dans la partie col du cryostat, chacune par un tube (Ø 8 x 0,5 mm) de longueur active

542 mm, en laiton recuit (Cu; 35,72 % Zn ; 3,3 % Pb ; 1 % Sn). Le flux de chaleur dans LHe par conduction solide est ainsi très réduit, par contre celui induit par effet Joule est augmenté. Une ventilation abondante (500 l/h) des descentes lors de la brève phase de la montée en champs est indispensable mais comme le débit des vapeurs froides produit par l'évaporation naturelle est insuffisant une chaufferette électrique placée dans le réservoir de garde en fournit le complément.

Une soupape de sécurité S_4 (tarage 0,35 bar) protège le cryostat d'une surpression en cas d'incident sérieux (transition de l'aimant, rupture du vide d'isolation. Les vapeurs très froides mais très denses à la sortie du cryostat se déchargeront alors dans l'atmosphère sans créer une surpression notable (phénomène spectaculaire mais inoffensif).

Le vide de l'isolation thermique est statique, assuré en principe par cryopompage. Toutefois deux charges de charbon actif placées respectivement dans le fond des réservoirs LN_2 et LHe assurent un vide correct ($\leq 10^{-4}$ mbar) lors de la mise en froid. Un contrôle épisodique du vide d'isolation est possible à l'aide d'une cote de jauge du type CF 2P placée sur l'enceinte. La réévacuation exige un robinet spécial (plan B.T. réf. 31.05) avec clapet détachable qui reste sur l'enceinte, aspiré par son vide, et agit également comme soupape de sécurité en cas d'une surpression accidentelle dans l'espace vide.

2.5. Equipements de contrôle et de surveillance

Le contrôle et la surveillance des cryofluides s'effectue à l'aide des équipements suivants :

- Panneau de pressurisation de la réserve d'LHe
- Panneau des dégazages du cryostat
- Pompe à vide avec déshuilage pour le bain d'LHe pompé
- Compteur à gaz totalisant le débit d'He récupéré
- Coffrets de mesure pour détection d'LHe
- Coffret de mesure de températures

Ces équipements (à l'exception du compteur à gaz) sont placés à quelques mètres du cryostat dans deux supports de paniers de rack 19".

2.5.1. Panneau de pressurisation

Pour siphonner LHe du conteneur de réserve dans le cryostat il faut ouvrir la vanne cryogénique V_5 et créer une surpression sur le liquide à transférer. Pour ce faire la respiration du réservoir RS 100 A est interrompue par la fermeture de l'électrovanne V_6 et une chaufferette électrique vaporise de LHe dans le réservoir donneur jusqu'à l'atteinte de la surpression de consigne (150 à 200 mbar maxi) contrôlé par le pressostat P_1 . La montée en pression est limitée, de toute façon, par une soupape S_5 (tarage 250 mbar) dont la sortie est connectée sur la récupération.

Le robinet manuel V_7 , en série avec l'électrovanne V_6 , autorise des régimes particuliers :

- une pressurisation de secours en l'absence de l'électro-vanne V_6
- une pressurisation légère en-dessous de la pression de consigne du pressostat P_1 et le maintien (non contrôlé) de cette surpression.
- le maintien d'une pressurisation dans le conteneur de réserve.

2.5.2. Panneau des dégazages d'He

Le panneau des dégazages d'He contrôle trois débits distincts avant de les réunir dans un collecteur commun :

2.5.2.1. Dégazage principal

C'est un conduit de section confortable ($\emptyset \geq 16$ mm) capable d'évacuer, en régime stationnaire et au moment d'un transfert de complément d'LHe, la totalité des vapeurs produites. Ce n'est qu'en cas d'incident (transition de l'aimant supra, perte brutale du vide d'isolation, etc.) que la soupape de sécurité S_4 (tarage 0,35 bar) décharge l'excédent non maîtrisable des vapeurs froides dans l'atmosphère. En exploitation normale les vapeurs se réchauffent au passage d'un tube à ailettes (\emptyset_1 20 mm, long. 3 m) avant d'entrer sur le panneau de contrôle.

La vanne V_9 (derrière le panneau) autorise une isolation du cryostat (contrôle d'étanchéité) mais également un freinage du dégazage (phase de la mise en froid).

La vanne de décharge V_9 agit comme une soupape très sensible (ouverture franche à 12 mbar, fermeture correcte à 10 mbar) et crée ainsi une différence de pression permanente entre le bain d'LHe et le collecteur de récupération.

La vanne V_{11} permet d'établir une liaison avec le dégazage pompé (conditionnement initial ; équilibrage avec le dégazage pompé).

2.5.2.2. Ventilation des descentes

Les descentes de courant exigent une ventilation abondante lors de la montée en courant de l'aimant supra. Cette opération active automatiquement l'électrovanne V_{12} et la différence de pression de 10 mbar imposée par la vanne de décharge V_9 engendre un débit de balayage ajustable avec le robinet à aiguille V_{13} sur le débitmètre à flotteur (env. 500 l/h). Cependant comme ce débit est supérieur à celui de l'évaporation naturelle du cryostat la différence de pression imposée chuterait sans l'intervention du pressostat différentiel P_2 qui enclenche une chaufferette immergée (4 W) dans le réservoir de garde. Cette action est visualisée par l'ampoule témoin sur le synoptique à l'emplacement de P_2 .

2.5.2.3. Dégazage du bain pompé

Le dégazage du bain pompé (voir § 2.4.), très intense en début du sous-refroidissement, se réchauffe également dans un deuxième tube à ailettes avant d'entrer sur le panneau de contrôle.

La vanne V_{14} permet d'ajuster le débit massique aspiré par la pompe à vide selon les exigences (température à atteindre ou à maintenir, régime de travail acceptable pour la pompe). Le manomètre M_4 en amont de V_{14} nous indique la pression et, par conséquent, la température du bain pompé (tension de vapeur de LHe, voir Fig.2.6), M_5 en aval de V_{14} nous permet une évaluation du débit massique traité par le pôle en connaissant son débit volumique.

La soupape S_6 (tarage 1 bar) protège la liaison bain pompé - panneau dégazages d'une surpression accidentelle en cas d'une fermeture simultanée et durable des vannes V_{14} et V_{15} en régime cryogénique.

2.5.3. Pompe à He

Pour réduire la pression sur le bain pompé on utilise une pompe à vide d'un débit suffisant (25 à 40 m³/h) genre Busch ou Alcatel avec ventilation améliorée (la compression de l'He gaz provoque un échauffement supérieur à celle de l'air). La pompe est équipée au refoulement d'un déshuileur efficace,

éventuellement suivi d'un filtre à charbon actif pour éviter un entraînement d'huile vers le système de récupération.

2.5.4. Compteur à gaz

Un compteur à gaz standard de 10 m³/h est placé sur le collecteur de récupération. Ce compteur est équipé de deux vannes V₁₇ et V₁₈ qui permettent son isolation de la conduite, ainsi que d'une vanne by-pass V₁₉. La soupape S₇ (tarage 0,3 bar) protège le compteur d'une surpression accidentelle.

Le compteur à gaz a deux fonctions distinctes :

- Contrôle du processus cryogénique, notamment du taux d'évaporation d'He pendant les différentes phases de travail (mis en froid, régime stationnaire, transferts de complément, etc...).
- Gestion de l'hélium confié : L'utilisateur reçoit du Centre de liquéfaction une masse connue d'He sous forme liquide qu'il est censé de restituer sous forme gazeuse.

4. CONSOMMATION DE CRYOFLUIDES, AUTONOMIES

4.1. AZOTE LIQUIDE

4.1.1. Consommation pour la mise en froid

- Mise en froid du réservoir de garde d' LN_2 non mesuré
estimativement 10 l LN_2
- Prérefroidissement à LN_2 de l'ensemble
vase LHe + bobine de 300 K à 80 K 18 à 20 l LN_2

4.1.2. Consommation statique

- Dégazage du réservoir de garde : 373 l/h soit 0,54 l LN_2 /h

4.1.3. Autonomie

- Autonomie d'un plein du réservoir de garde
d'une contenance de 18 l 33 heures

4.2. HELIUM LIQUIDE

4.2.1. Consommation pour la mise en froid

- Mise en froid de l'ensemble vase LHe + bobine
de 300 K à 4 K 60 l LHe
- Idem pour 80 K à 4K 15 l LHe

4.2.2. Consommation statique du cryostat

- Régime Exploitation bobine:
Dégazage entre niveaux haut et bas : 300 l/h soit 0,40 l LHe/h
- Régime Veille :
Dégazage entre niveau bas et bobine sèche : 255 l/h soit 0,35 l LHe/h

4.2.3. Autonomie

- Autonomie régime Exploitation bobine
pour un $\Delta V = 17$ l 42 heures
- Autonomie régime Veille
pour un $\Delta V = 9$ l 25 heures
- Autonomie combinée (niveau haut à bobine sèche)
pour un $\Delta V = 26$ l 67 heures

4.2.4. Pertes d'un transfert de complément

- Vaporisation pour la mise en froid de la ligne transfert 1,7 l LHe
- Equivalent des vapeurs expulsées entre niveaux bas et haut 3,8 l LHe
- Pertes totales par transfert de complément 5,5 l LHe

4.2.5. Consommation statique du conteneur équipé

- Dégazage mesuré du conteneur RS 100 A avec un contenu de 75 l (= 75 % de la capacité) équipé avec tête et canne de transfert à demeure : 120 l/h soit

0,16 l/h (x)

(x) correspondant à une consommation de 3,84 l LHe par 24 h, soit près de 4 fois le taux de vaporisation garantie par le constructeur d'un conteneur non équipé.

Fig 1

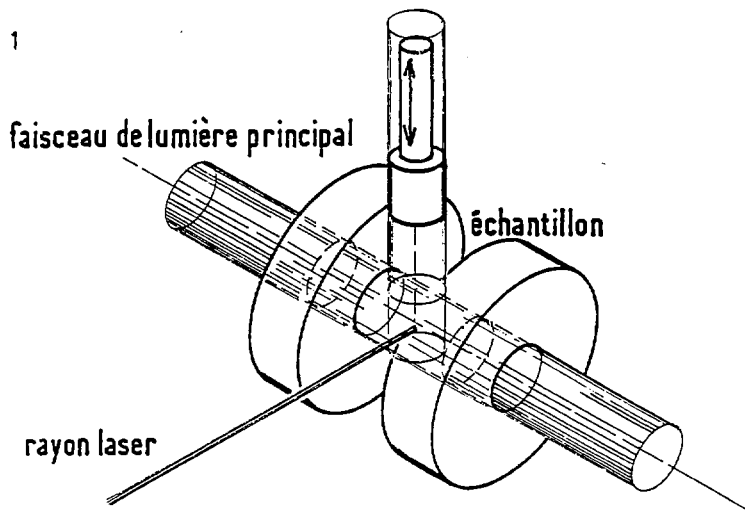
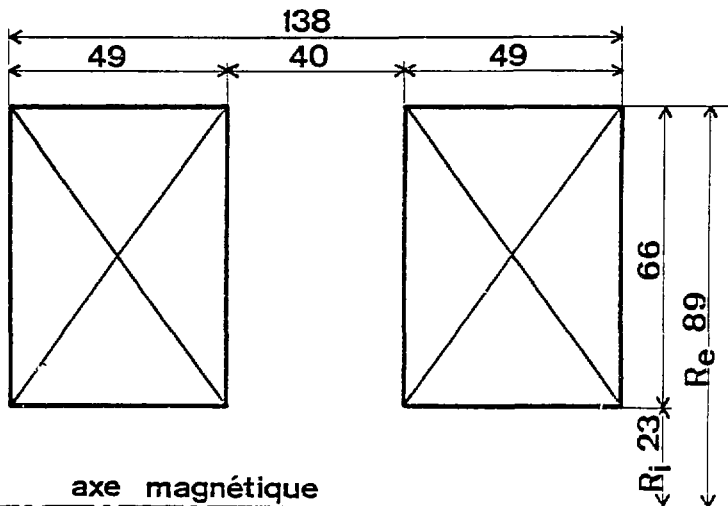


Fig 2



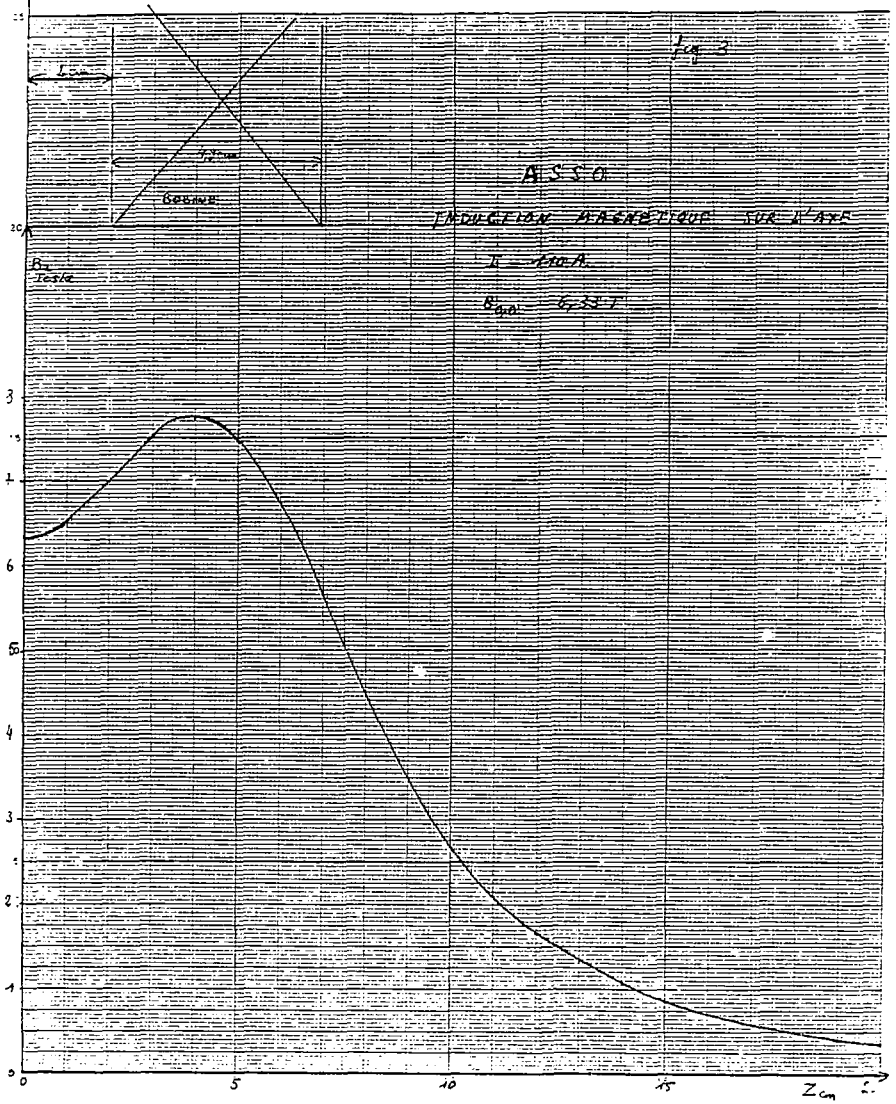
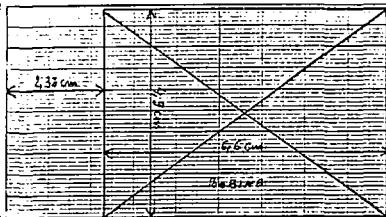


Fig 4



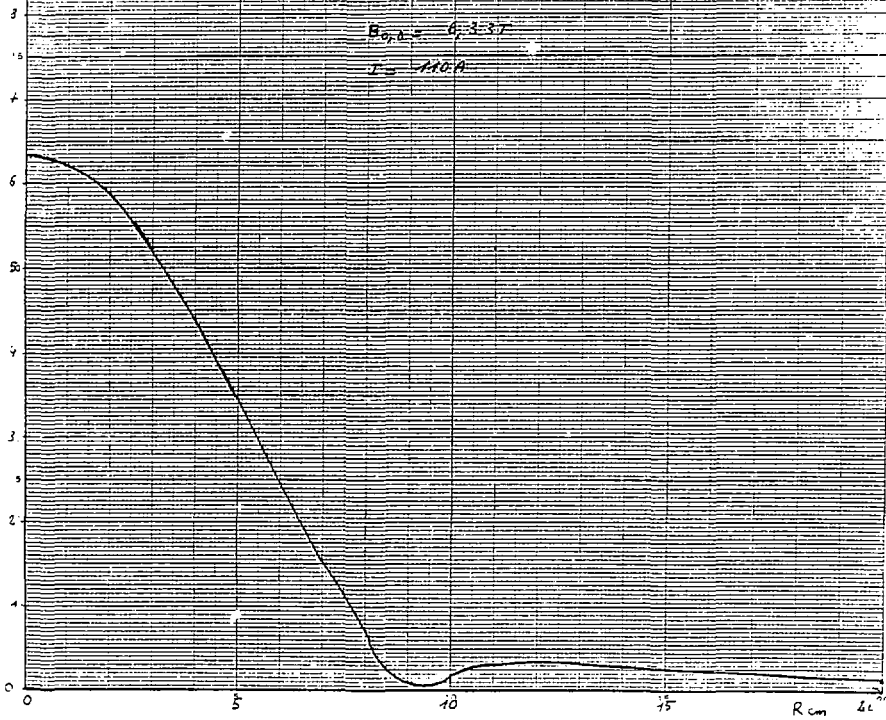
A 550

B_z
Tesla

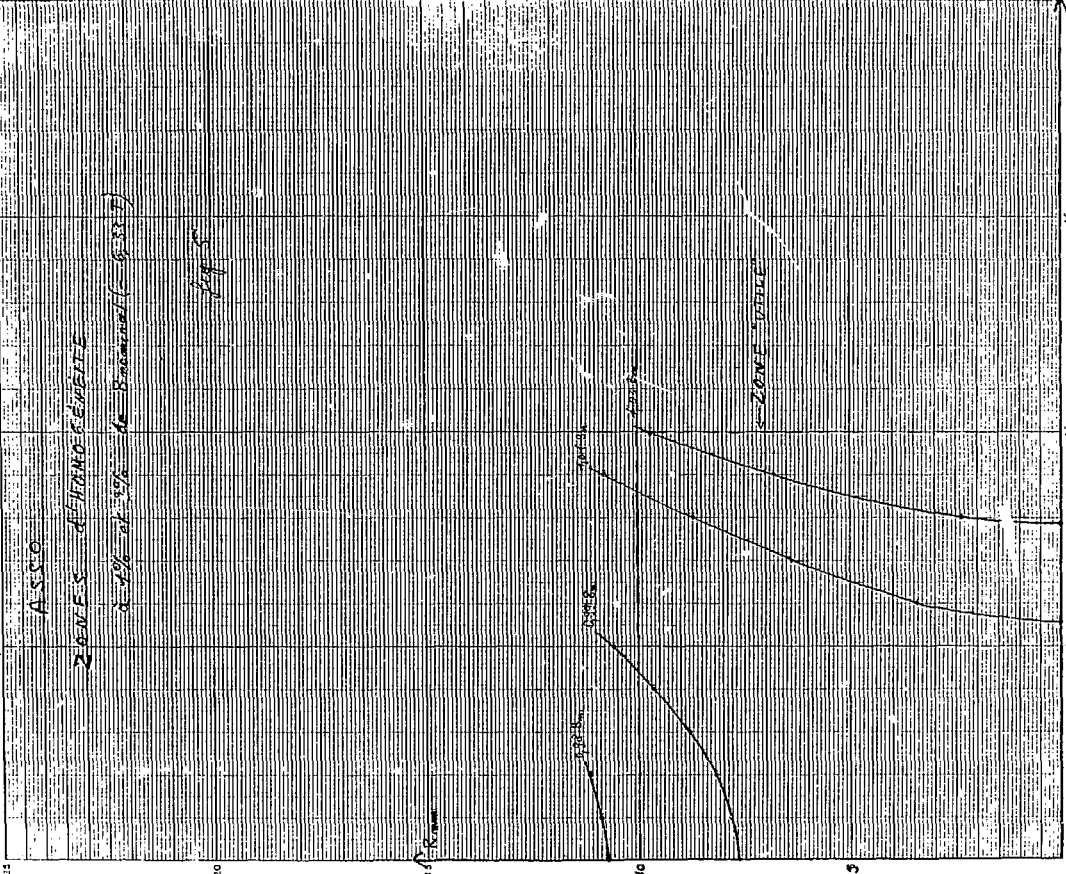
INDUCTION MAGNETIQUE B_z
dans le plan médian
perpendiculaire à l'axe (Z-O)

$$B_{0z} = 6.3 \cdot 10^{-3} \text{ T}$$

$$I = 110 \text{ A}$$



1000000



A.S.S.O.

ZONE S. QUADRANTE

2-20% of 20% of 20% of 20%

20%

1000000

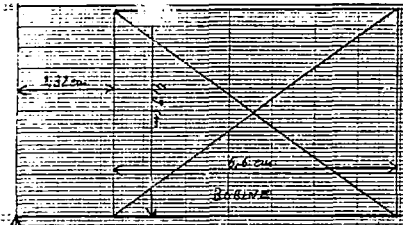
100000

10000

Z-ZONE "DIME"

CURVE HEIGHT

Z mm

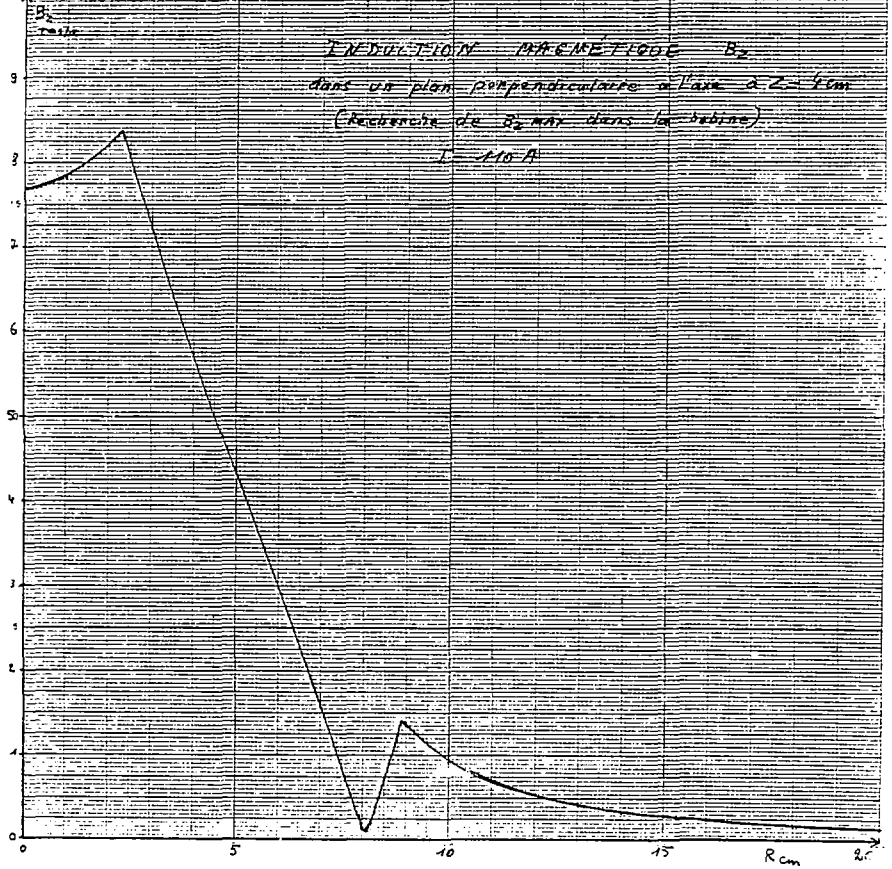


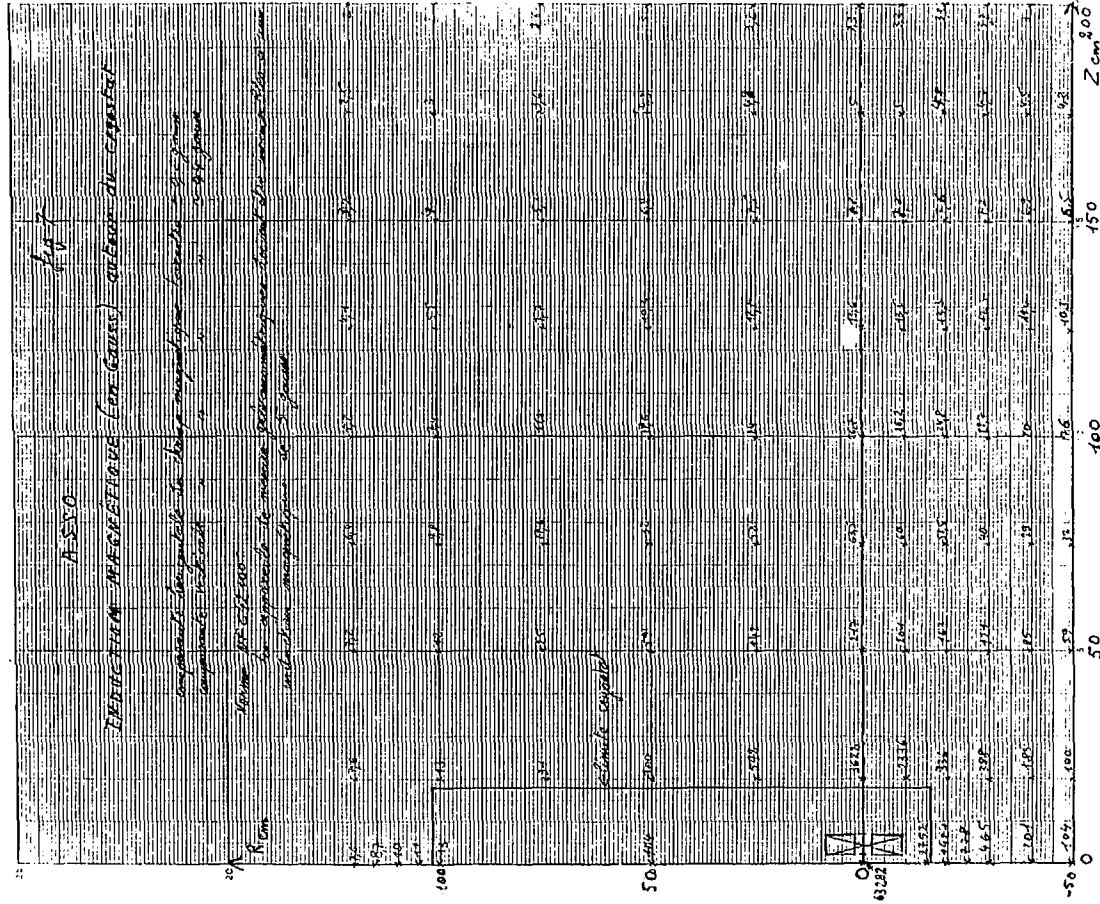
Page 6

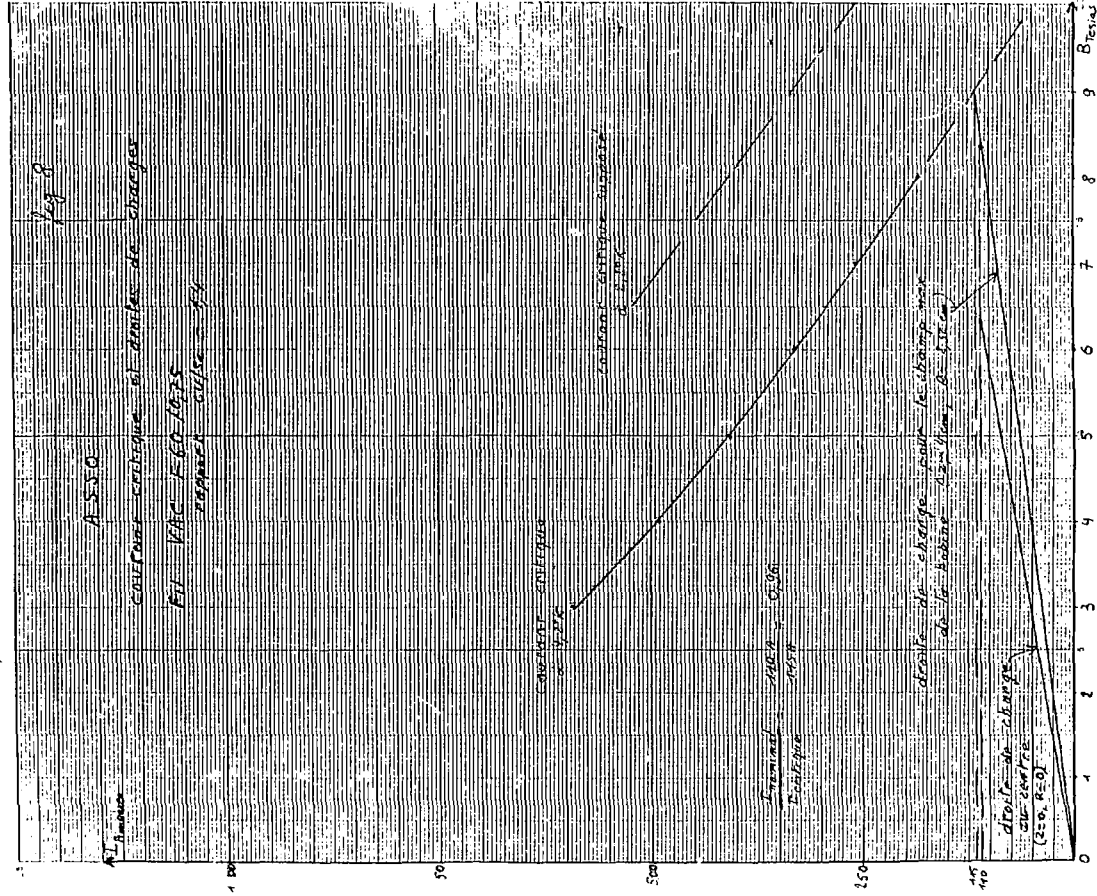
ASSO

INDUCTION MAGNETIQUE B_z
 dans un plan perpendiculaire à l'axe z - 1 cm
 (Recherche de B_z max dans la bobine)

$I = 110 A$







A.S.S.O

figure 9

$$T_c(I, \theta) = T_0 + \left[1 - \frac{\pm}{I_c(I_0, \theta)} \right] \left[I_c(I_0, \theta) - T_0 \right]$$

$T_0 =$ Température du bain = $4,2^\circ\text{K}$
 $I =$ Courant de fonctionnement = 160A .

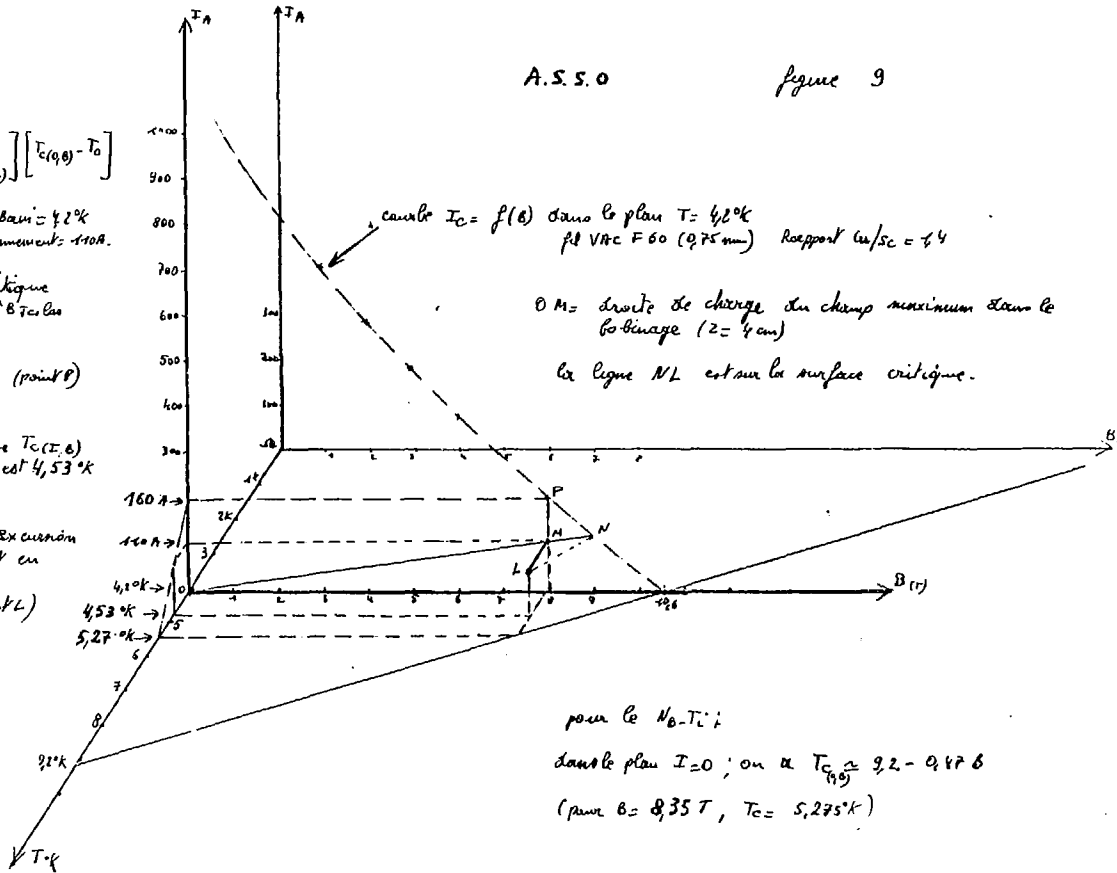
$I_c(T_0, \theta) =$ courant critique
à $4,2^\circ\text{K}$ et à $8,35\text{T}$

à $4,2^\circ\text{K}$ et $8,35\text{T}$

$I_c(T_0, \theta) = 160\text{A}$ (point P)

la Température Critique $T_c(I, \theta)$
pour 160A et $8,35\text{T}$ est $4,53^\circ\text{K}$
(point L)

on a droit à une excursion
de $0,33^\circ\text{K}$ seulement en
Température
(point M \rightarrow point L)



CIRCUIT ELECTRIQUE DE L'AIMANT ET ANNEXES

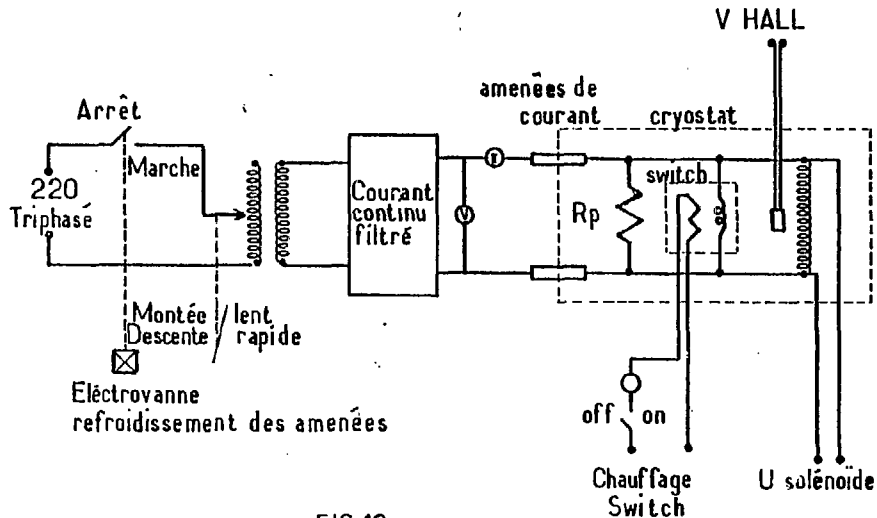


FIG 10

log m

0.550

CONGRANT KRITIQUE à 4.5%

du FH de *Mentha piperita* super oxidée (Bou)

au MAC (1000-60-70-d) Composé 4.4

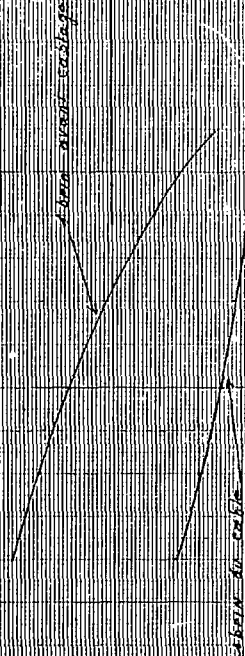
coffre consistant de 9 boîtes (1000) françaises

1000

100

50

0



libre au cube

libre au cube

log m

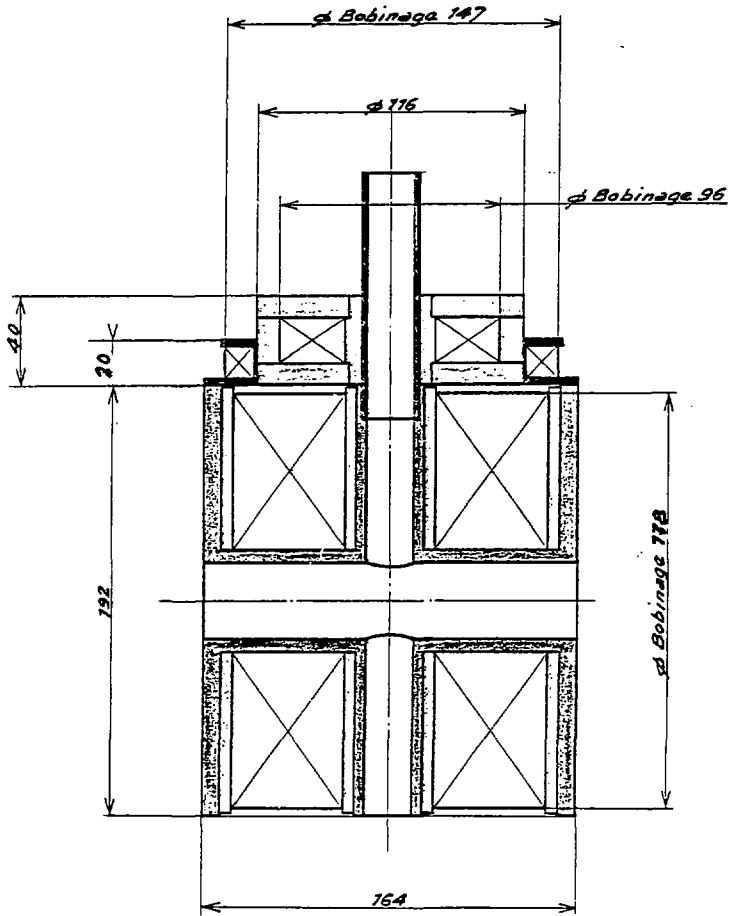
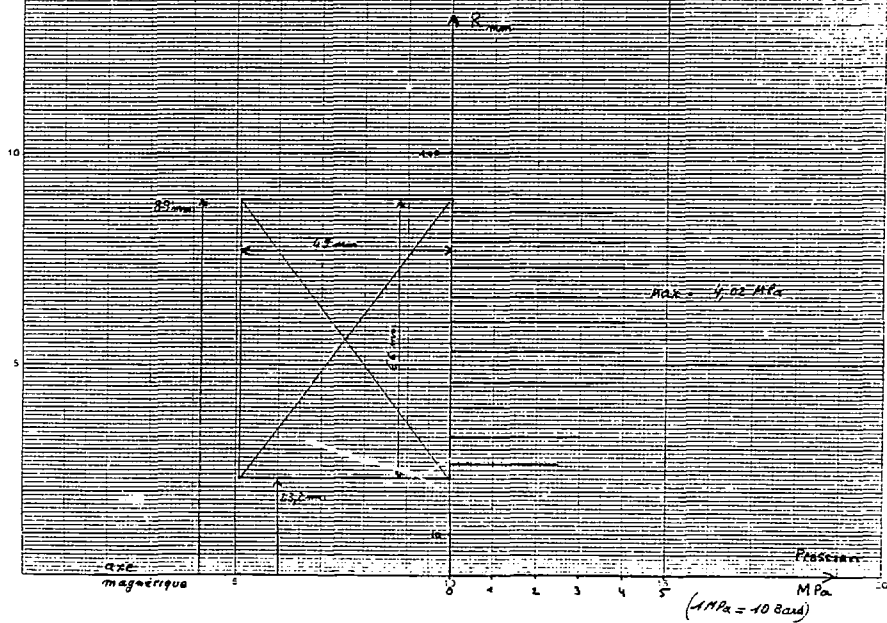


FIG.12

fig 13

ASSE

Force d'attraction axiale des 2 bobines 8600 daN
ci-dessous repartition des pressions d'attraction axiale



max = 4,02 MPa

axe
magnetique

Pression

MPa

(MPa = 10 bar)

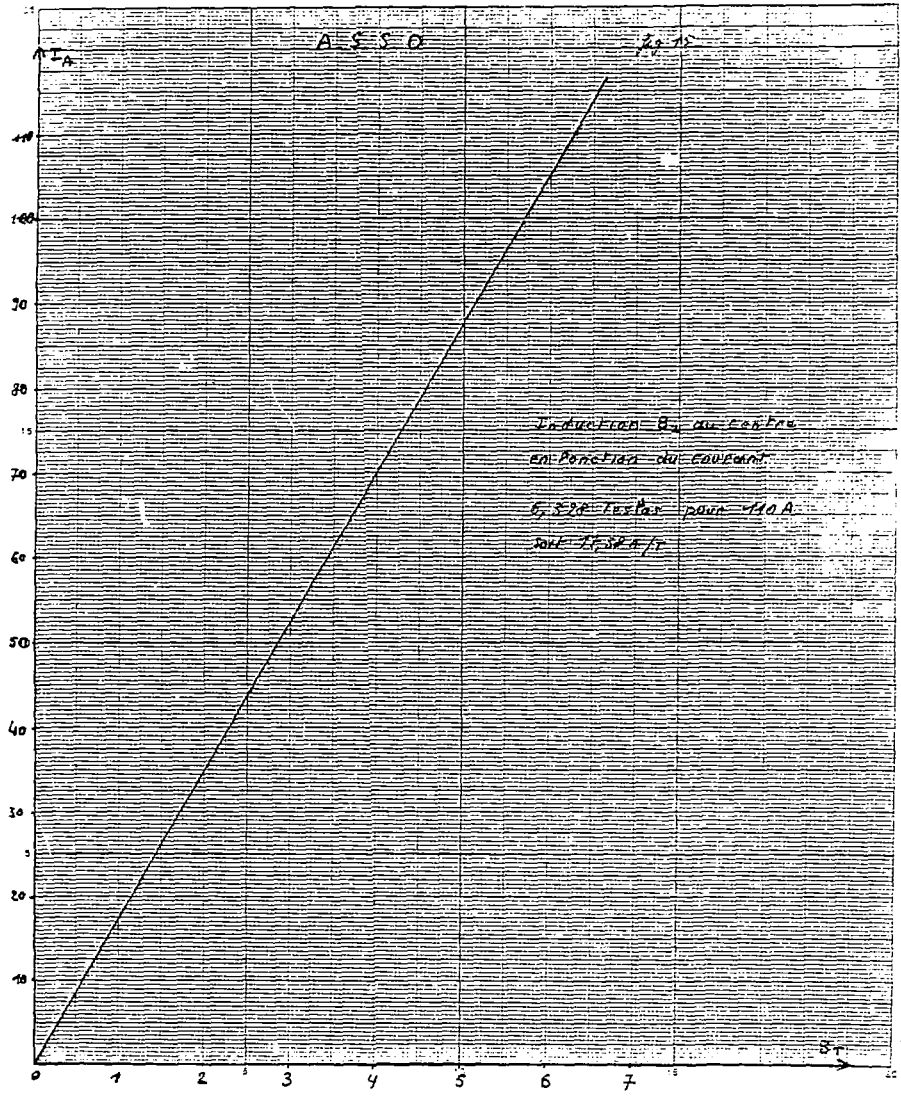
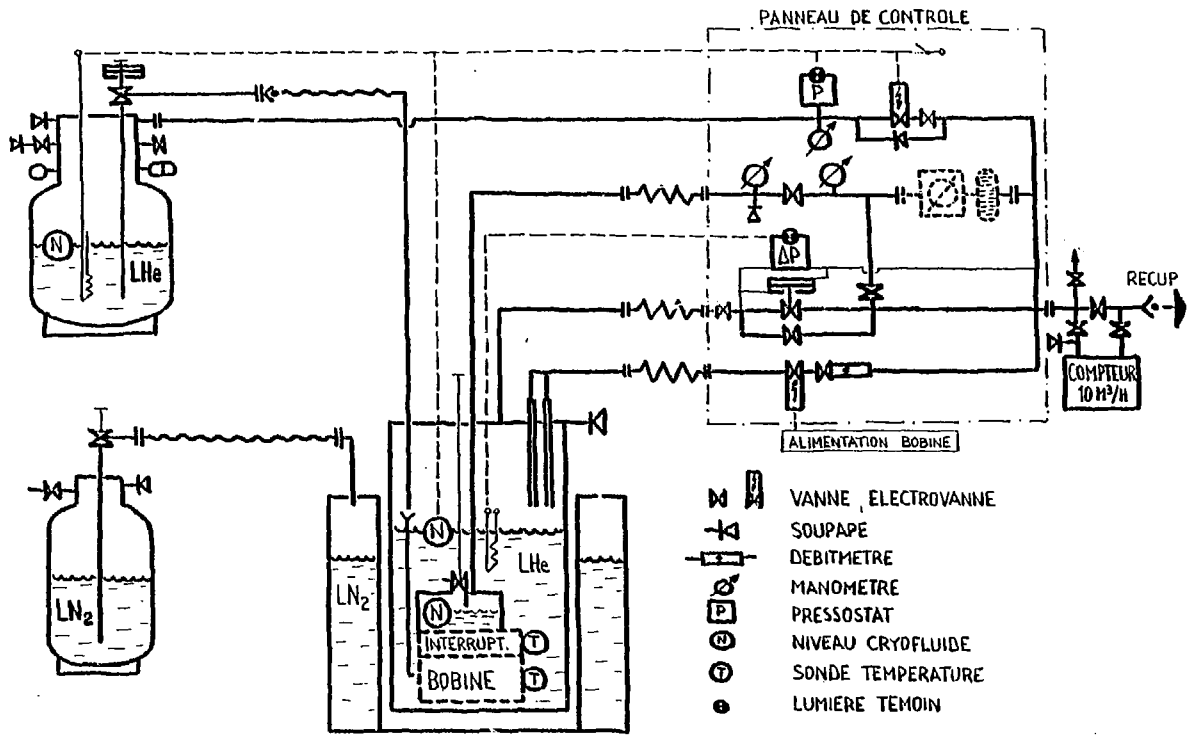


figure 14

- contraintes tangentielles (en MPa) dans le plan médian de la bobine.
- déflexion radiale en μm .

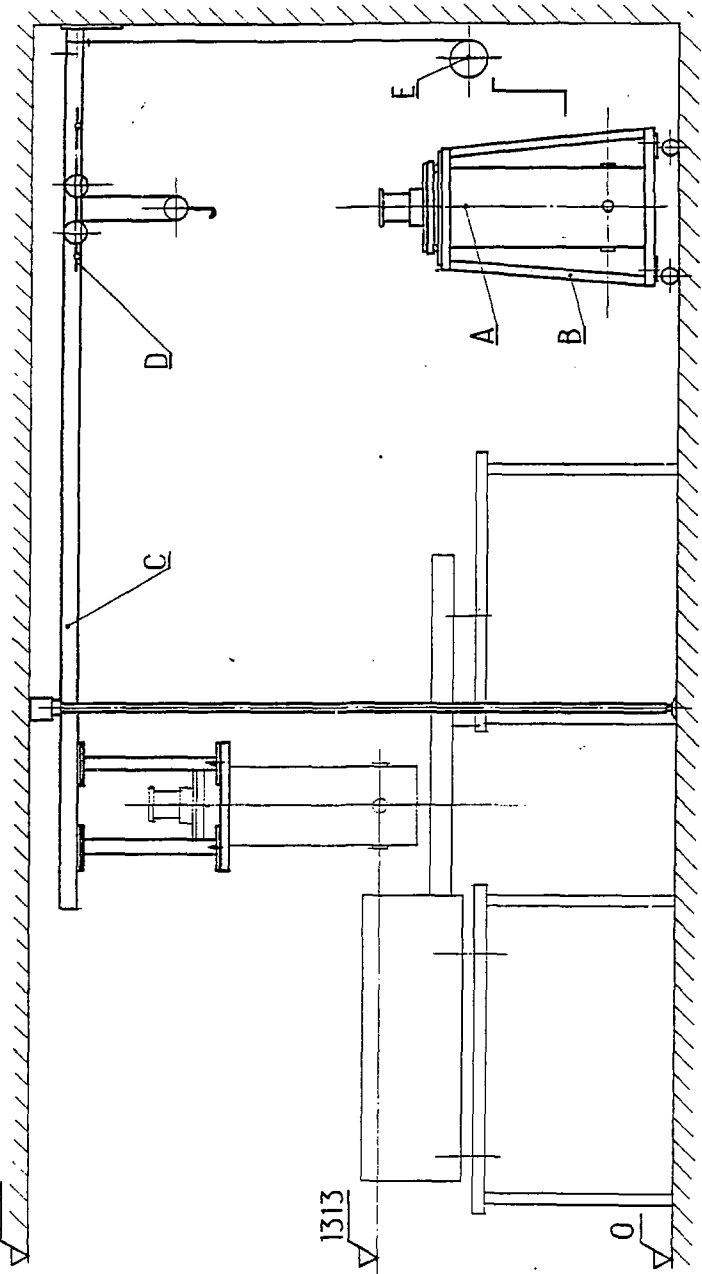
opération	mandrin		bobine		déflexion radiale
	$R_1 = 18 \text{ mm}$	$R_2 = 23 \text{ mm}$	$R_2 = 23 \text{ mm}$	$R_3 = 89 \text{ mm}$	
fabrication du bobinage	- 251	- 196	- 38,4	+ 60	- 22 μm
refroidissement	+ 16	+ 12,9	- 3,5	- 0,4	- 67 μm
à 4,2°K et I = 0	- 235	- 183,1	- 41,9	+ 59,6	- 89 μm
action électro-magnétique I = 110 A	+ 148	+ 116	+ 58	+ 15	+ 13 μm
à 4,2°K et I = 110 A	- 87	- 67,1	+ 16,1	+ 74,6	- 76 μm

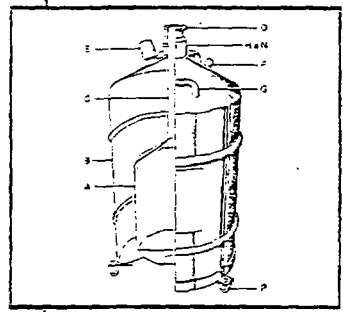
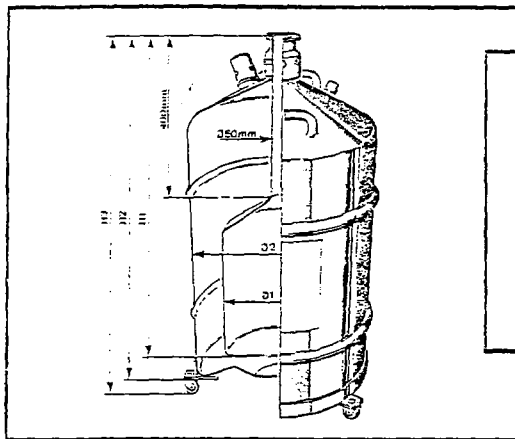
le signe + indique une contrainte de tension
 le signe - " " " " de compression



ASSO : LIAISONS ET CONTROLE DES CRYOFLUIDES

2910





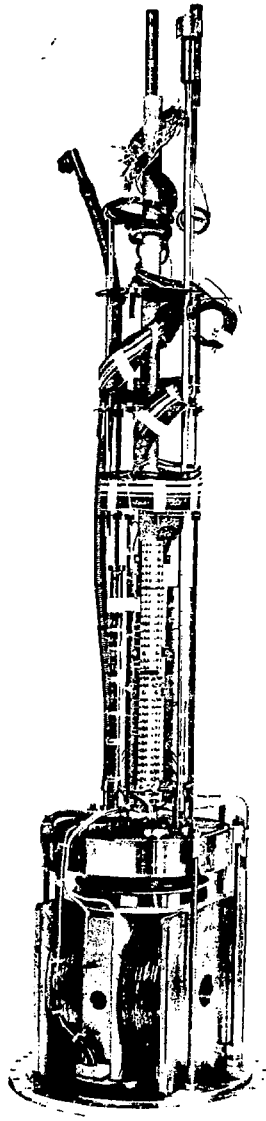
DESIGNATION DES ORGANES

- (Fourniture de base)
- A Réservoir intérieur
- B Enveloppe extérieure
- C Coi
- D Brice «PNEUROCP» DN 50
- E Dispositif de sécurité inter-carai
- F Clacet de mise sous vice
- G Poignees
- H à N Piquages pour
branchement d'accessoires.
- P Emcase à roulettes (en option)

		Ø 1	Ø 2	H 1	H 2	H 3
RS 38 A	mm	330	460	655	922	1052
RS 65 A	mm	460	503	358	1050	1130
RS 100 A	mm	460	503	1073	1260	1390

CARACTÉRISTIQUES	RS 38 A	RS 65 A	RS 100 A
Capacité utile	38 litres	65 litres	100 litres
Pression normale de service relative	0,5 bar	0,5 bar	0,5 bar
Poids à vide	23 kg	27,5 kg	33,5 kg
Poids plein d'hélium liquide	29 kg	36 kg	46 kg
Taux d'évaporation journalier	1,9%*	1,5%*	1%*
* réservoir équipé de sa tête BHK			

Fig. 2.4 : Conteneur de transport et de stockage pour LHe type L'Air Liquide RS 100A.



Aimant supraconducteur