

EUR 3384 f

COMMUNAUTE EUROPEENNE DE L'ENERGIE ATOMIQUE - EURATOM

LIBRARY

**APPLICATIONS DU PROCÉDE VAPOTRON
AUX REACTEURS NUCLEAIRES A EAU BOUILLANTE**

1968



Accord de Coopération EURATOM/USA

**Rapport EURAEC N° 1890 établi par
la Compagnie Française Thomson Houston, Chatou - France**

**Contrats Euratom/C.F.T.H./A.E.G./ALSTHOM
N° 001-61-6 ARF, N° 050-62-5 RDC et N° 034-63-11 TEEC**

AVERTISSEMENT

Le présent document a été élaboré sous les auspices de la Commission des Communautés Européennes.

Il est précisé que la Commission des Communautés Européennes, ses contractants, ou toute personne agissant en leur nom :

ne garantissent pas l'exactitude ou le caractère complet des informations contenues dans ce document, ni que l'utilisation d'une information, d'un équipement, d'une méthode ou d'un procédé quelconque décrits dans le présent document ne porte pas atteinte à des droits privés;

n'assument aucune responsabilité pour les dommages qui pourraient résulter de l'utilisation d'informations, d'équipements, de méthodes ou procédés décrits dans le présent document.

Ce rapport est vendu dans les bureaux de vente indiqués en 4^e page de couverture

au prix de FF 12.50	FB 125.—	DM 10.—	Lit. 1.560	Fl. 9.—
---------------------	----------	---------	------------	---------

Prière de mentionner, lors de toute commande, le numéro EUR et le titre qui figurent sur la couverture de chaque rapport.

Imprimé par SMEETS
Bruxelles, février 1968

Le présent document a été reproduit à partir de la meilleure copie disponible.

EUR 3384 f

COMMUNAUTE EUROPEENNE DE L'ENERGIE ATOMIQUE - EURATOM

**APPLICATIONS DU PROCÉDE VAPOTRON
AUX REACTEURS NUCLEAIRES A EAU BOUILLANTE**

1968



Accord de Coopération EURATOM/USA

**Rapport EURAEC N° 1890 établi par
la Compagnie Française Thomson Houston, Chatou - France**

**Contrats Euratom/C.F.T.H./A.E.G./ALSTHOM
N° 001-61-6 ARF, N° 050-62-5 RDC et N° 034-63-11 TEEC**

RESUME

Le principe VAPOTRON*, appliqué depuis 1950 dans le domaine de l'électronique, utilise une surface d'échange thermique essentiellement anisotherme en régime d'ébullition. L'étude de l'utilisation de ce principe en vue d'améliorer les performances des gaines de refroidissement des réacteurs nucléaires à eau bouillante a fait l'objet de 1961 à 1964 de trois contrats de recherches successifs.

Au cours d'un premier contrat, il est apparu que l'effet VAPOTRON connu sur le cuivre (conductivité thermique $\lambda = 3,94 \text{ W/cm } ^\circ\text{C}$) se manifeste sur des métaux mauvais conducteurs tels que l'acier inoxydable ($\lambda = 0,2 \text{ W/cm } ^\circ\text{C}$) même à la pression atmosphérique. La loi de similitude des dimensions en fonction de la conductivité prévue précédemment au cours d'essais analogiques a été vérifiée expérimentalement.

L'influence bénéfique de la pression a été vérifiée d'abord en «pool boiling» jusqu'à une pression de 70 bars; des flux spécifiques supérieurs à 800 Watts/cm^2 ont été atteints en régime stable sur échantillons avec écart maximal de température de $350 \text{ } ^\circ\text{C}$ entre la surface d'échange et le liquide.

La première partie du programme de recherches concernant des essais en vraie grandeur dans une boucle en convection forcée a consisté à étudier, à réaliser puis à mettre au point une série d'équipements spéciaux, comprenant notamment un système de chauffage indirect simulant au mieux le combustible nucléaire, un dispositif de mesures de températures, un détecteur de burn-out ainsi qu'un équipement de visualisation.

Au cours de la campagne d'essais en boucle qui fut menée à la fin du programme de recherches, les performances des gaines VAPOTRON furent comparées à celles de gaines cylindriques lisses.

La série des points de mesures obtenus correspond toujours par rapport aux meilleurs résultats connus sur gaines isothermes (General Electric, Thomson) à un gain variable avec les conditions de débit imposées et qui peut dépasser une valeur supérieure à 2 (jusqu'à 2,25 dans le cas de faibles vitesses massiques).

* Marque déposée C.F.T.H.

MOTS CLES

VAPOTRON EFFECT
SURFACES
COPPER
STAINLESS STEEL
POOL BOILING
PRESSURE
HEATING

TEMPERATURE
LABORATORY EQUIPMENT
BURNOUT
DETECTION
DIAGRAMS
WATER COOLANT
REACTORS

APPLICATIONS DU PROCÉDE VAPOTRON
AUX REACTEURS NUCLEAIRES A EAU BOUILLANTE(+)

I - INTRODUCTION

Le procédé VAPOTRON, qui a connu un rapide développement dans le domaine des tubes électroniques, a fait l'objet de trois contrats de recherches successifs en vue de l'amélioration des échanges thermiques dans les réacteurs nucléaires à eau bouillante.

Nous décrivons ici le déroulement de ce programme et nous présentons l'ensemble des résultats obtenus.

On notera que ces essais ont été notoirement influencés par les recherches et développements réalisés par ailleurs dans les Laboratoires de la Division Tubes Electroniques de la Compagnie Française THOMSON-HOUSTON.

N.B. Les repères donnés entre parenthèses au cours du texte correspondent aux références bibliographiques dont la liste figure à la fin du rapport.

(+) Manuscrit reçu le 30 août 1967.

II - HISTORIQUE

La technique VAPOTRON développée par la Compagnie Française THOMSON-HOUSTON à partir de 1950 avait initialement pour but l'amélioration du refroidissement des tubes électroniques de puissance.

Le principe du procédé VAPOTRON est basé sur le transfert de chaleur par l'intermédiaire d'un liquide en régime d'ébullition.

L'originalité du VAPOTRON consiste à s'écarter délibérément de la dissipation isotherme que l'on a coutume d'utiliser.

La paroi externe de transfert thermique, non isotherme, en contact avec le liquide en ébullition est constituée d'une structure VAPOTRON en forme de protubérances ou de nervures dont les extrémités en restant relativement froides protègent les parties creuses qui peuvent alors atteindre en fonctionnement stable des températures supérieures à la température de crised'ébullition sans qu'apparaisse le phénomène de caléfaction (1), (2).

Le système VAPOTRON a été l'objet de nombreux développements dans le domaine de l'électronique et se trouve aujourd'hui utilisé industriellement dans le monde entier, au point de s'être pratiquement généralisé dans tous les grands émetteurs de radio-diffusion actuellement en construction.

Dans le cas des structures VAPOTRON en cuivre utilisées dans les tubes électroniques, le gain obtenu par rapport à des structures classiques isothermes, peut atteindre une valeur voisine de 10.

Ces résultats très surprenants ont conduit à penser que la technique VAPOTRON pouvait apporter d'intéressantes améliorations des échanges thermiques dans les réacteurs nucléaires à eau bouillante grâce à l'augmentation substantielle du flux thermique utilisable dans des conditions de sécurité améliorées par l'éloignement du risque de caléfaction.

Cette application avait fait l'objet d'un brevet déposé en 1955 par la Compagnie Française THOMSON-HOUSTON (3).

Des calculs préliminaires avaient montré que le bilan neutronique de tels réacteurs ne serait que peu affecté par la masse supplémentaire du matériau de gainage dans la mesure où l'étude confirmerait que le volume des éléments dissipatifs pourrait être réduit d'une façon appréciable.

Les essais effectués dans le cadre d'un premier contrat, dans les laboratoires de la Compagnie Française THOMSON-HOUSTON, sur des structures VAPOTRON élémentaires, sur des métaux de conductivité thermique de plus en plus faible tels que le cuivre, le nickel et l'acier inoxydable ont permis de vérifier les phénomènes suivants :

- Existence de l'effet VAPOTRON avec des métaux mauvais conducteurs.
- Confirmation de la loi de similitude selon laquelle les dimensions des structures VAPOTRON sont inversement proportionnelles à la conductivité du métal essayé.
- Vérification de l'effet bénéfique de la pression dans le cas de parois VAPOTRON.

Ces premiers résultats justifiaient la poursuite de l'étude en vue de l'utilisation de structures VAPOTRON en matériau nucléaire, fonctionnant sous les pressions habituelles des réacteurs à eau bouillante.

Dans ce but, un deuxième contrat d'une durée de 14 mois fut signé dans le cadre des accords EURATOM / US. A.E.C.

Les travaux ont été dirigés simultanément dans deux voies. D'une part, des essais systématiques ont été faits sur des échantillons de grandes dimensions dans le but de chercher à préciser la loi d'échange sur une paroi non isotherme. D'autre part, des études ont été effectuées sur des structures VAPOTRON élémentaires, afin de déterminer les formes et les dimensions favorables en s'inspirant de leur évolution dans la technique VAPOTRON du domaine électronique.

C'est au cours de cette période que furent effectués les premiers travaux d'adaptation de la boucle d'expérimentation en convection forcée ALSTHOM en vue des essais sur gaines VAPOTRON de grande longueur.

L'expérimentation en boucle est ensuite conduite jusqu'en Décembre 1964 au cours d'un troisième contrat orienté vers la comparaison des performances de "burn-out" des gaines VAPOTRON et des gaines cylindriques lisses classiques.

Ces expériences ont entraîné l'étude et la mise au point d'équipements spéciaux tels que système de chauffage indirect simulant le combustible nucléaire, procédé de mesures des températures, détecteur de "burn-out", système de visualisation.

Les essais ont porté sur différentes configurations de gaines VAPOTRON à une pression de 70 bars pour différentes valeurs de la vitesse massique ainsi que du titre à l'entrée.

L'analyse des résultats obtenus ainsi que des possibilités de développement éventuel fait l'objet de ce rapport.

III - EXPERIMENTATION EN "POOL BOILING"

Cette expérimentation a permis de vérifier sur des structures VAPOTRON élémentaires, l'influence de la nature du métal et de l'augmentation de la pression.

Les quatre bancs d'essais qui furent utilisés correspondent à des pressions nominales croissant jusqu'à 70 bars. (Fig. 1 et 2).

1. RAPPEL DU PRINCIPE VAPOTRON (4)

La technique du VAPOTRON est basée sur l'utilisation de surfaces d'échanges essentiellement non isothermes.

Dans ce but, la paroi d'échange est agencée pour présenter des zones "froides" et des zones "chaudes" entre lesquelles s'établit un gradient stable de température pouvant s'étendre sur une centaine de degrés Celsius ou même davantage.

Le moyen utilisé pour obtenir cet effet consiste à disposer des protubérances ou des nervures sur la surface de façon à en faire varier l'épaisseur.

Le long d'une telle structure VAPOTRON, fonctionnant en régime anisotherme, on retrouve successivement de l'extrémité à la base de la dent VAPOTRON les trois régimes de convection, d'ébullition nucléée et de vaporisation pelliculaire (Fig. 3)

2. LOI D'HOMOTHEIE ENTRE LES PARAMETRES GEOMETRIQUES ET LA CONDUCTIVITE THERMIQUE DU METAL

Les essais analogiques à la cuve rhéographique réalisés par la Compagnie Française THOMSON-HOUSTON en 1956 (5) avait fait apparaitre une loi de similitude laissant prévoir que les dimensions caractéristiques de chaque élément dissipatif devraient être proportionnelles à la conductivité du matériau.

Cette loi n'avait été vérifiée que pour des métaux bons conducteurs et son extension dans le domaine du contrat n'était nullement évidente, puisqu'on ne savait absolument pas comment évoluerait le phénomène hydrodynamique complexe en présence de gradients de températures beaucoup plus élevés.

Des essais préliminaires entrepris au début de 1961 venaient démontrer que la loi d'échange thermique non linéaire sur un échantillon en cuivre de grandes dimensions justifiait pour le cuivre les hypothèses faites précédemment.

Ces essais consistaient principalement à suivre l'évolution du phénomène VAPOTRON et les répartitions de température sur la surface pour différentes valeurs du flux thermique injecté à la base du bloc de cuivre.

Le flux thermique pénétrant dans la base de l'échantillon était déterminé par application de la loi de FOURIER en partant de la mesure des températures dans deux sections droites à distance connue.

Des thermocouples de très faibles dimensions étaient plantés à mi-épaisseur de l'échantillon et donnaient les températures dans un même plan horizontal, sous les surfaces d'échange.

C'est à partir des dimensions de ce bloc de cuivre, qu'ont été déterminés, au cours du premier contrat, des échantillons en nickel et en acier inoxydable, dont les dimensions avaient été choisies en appliquant arbitrairement la loi d'homothétie.

L'utilisation du nickel dont la conductibilité est intermédiaire entre le cuivre et l'acier inoxydable, devait permettre d'effectuer normalement les mesures en évitant d'avoir à miniaturiser d'emblée l'échantillon, d'autant plus que l'existence du phénomène VAPOTRON sur un échantillon en acier inoxydable à la pression atmosphérique pouvait alors être mise en doute.

Les dimensions de chacun des nouveaux échantillons qui figurent ci-dessous sont déduites des cotes de l'échantillon en cuivre par réduction suivant le rapport des valeurs des conductivités thermiques (figure 4).

TYPE D'ECHANTILLON	LONGUEUR en cm	ÉPAISSEUR en cm	HAUTEUR en cm
Cuivre	10	3	2
Nickel	1,73	0,52	2
Acier inoxydable	0,56	0,17	2

Les résultats obtenus sont représentés par la courbe du flux injecté à la base de l'échantillon en fonction de l'écart de température $\Delta\theta_b$ entre la base et la température de saturation.

La figure n° 5 montre l'allure de la courbe représentative.

Dans le tracé de cette courbe, une augmentation systématique de pente est rencontrée avant le point de décrochage.

Après observation visuelle de l'évolution du phénomène VAPOTRON au cours des différents essais, on a vérifié que cette remontée est due à l'apparition de l'ébullition nucléée sur la face frontale ce qui correspond à une participation plus intense de cette face au transfert thermique global de l'échantillon.

Ceci a été vérifié en réalisant des échantillons de même section de base, mais de formes diverses : face frontale égale à la section de base, face frontale élargie ou, réduite à une arête. La présence de la face frontale permet d'atteindre des performances plus élevées et assure en outre une sécurité plus grande dans le cas du fonctionnement au voisinage du palier de la courbe.

Les essais des échantillons homothétiques précédents en cuivre, nickel et acier inoxydable ont été tout à fait concluants. Il fut en effet vérifié que pour un flux thermique constant dans la base de ces échantillons, les répartitions des températures sur la longueur de chacun des échantillons sont très comparables.

On doit remarquer que ce résultat dépassait ce qu'on était en droit d'espérer sous la pression atmosphérique et qu'il justifiait brillamment la valeur de l'étude entreprise.

Un essai complémentaire sur un élément de barreau de 10 cm en acier inoxydable comportant une structure VAPOTRON de section triangulaire, a permis de constater, à la pression atmosphérique l'existence d'un régime VAPOTRON parfaitement stable et réversible.

3. LOI DE PRESSION

Une augmentation de pression en régime d'ébullition entraînant une diminution corrélative du volume de vapeur ainsi qu'une réduction des dimensions des bulles, il était évident que le fonctionnement sous haute pression devait améliorer encore le régime VAPOTRON qui avait été constaté sur des échantillons de dimensions très réduites sous la pression atmosphérique.

Cet espoir dont la confirmation était nécessaire pour répondre aux impératifs neutroniques d'un réacteur a été pleinement vérifié.

Des essais effectués sur les échantillons précédents, sous une pression de 30 bars, ont permis de noter l'influence grandement bénéfique de la pression et de confirmer que les échantillons en acier inoxydable utilisés avaient des dimensions surabondantes tout comme l'échantillon de cuivre à partir duquel ils avaient été définis.

En effet, des valeurs de flux de base de 700 W/cm^2 ont été atteintes sous cette pression, alors que 50 % de la surface

II

latérale de l'échantillon se trouvait pratiquement à la température du liquide (Figure 6).

Comme la diminution de la conductivité thermique, l'augmentation de la pression permettait d'améliorer très sensiblement les performances des ailettes VAPOTRON et autorisait en outre, une nouvelle réduction de leurs dimensions. Ceci fut réalisé avant d'effectuer une série de mesures à 70 bars. Des valeurs de flux de l'ordre de 830 W/cm^2 ont été obtenues au cours de ces mesures avec un écart de température de 350° C (Figure 7). Il faut noter que ces valeurs n'étaient sans doute pas maximales, mais qu'elles n'ont pas pu être dépassées par suite des températures prohibitives atteintes sur le support d'échantillon dont la résistance mécanique à 70 bars devenait insuffisante.

Un essai effectué sur une dent VAPOTRON en acier inoxydable, en faisant varier la pression de 1 à 70 bars avec un flux constant de 360 W/cm^2 permet de mesurer une diminution systématique de 60 % de l'écart de température $\Delta \theta_b$ (Figure 7).

4. CONCLUSION DES PREMIERS ESSAIS EN "POOL BOILING"

L'ensemble de ces résultats en "pool boiling" en confirmant l'effet bénéfique de la pression a permis d'espérer que des gainages de dimensions très réduites seraient réalisables et compatibles avec leurs conditions d'emploi dans un réacteur nucléaire à eau bouillante.

IV - DETERMINATION DE LA GEOMETRIE DES
STRUCTURES DE GAINES VAPOTRON

Différentes géométries de gaines VAPOTRON susceptibles d'être utilisées pour des essais réalistes dans une boucle en convection forcée, ont été définies à partir d'une série d'études de configuration de gaines et d'expériences sur des structures élémentaires.

Les principaux paramètres de cette géométrie sont les dimensions caractéristiques des éléments dissipatifs et celles de leurs intervalles.

1. GEOMETRIE DE L'ELEMENT DISSIPATIF VAPOTRON

L'étude de la géométrie de l'élément dissipatif avait donné lieu à des développements successifs dans le domaine des tubes électroniques, dont les performances avaient progressé par étapes caractéristiques jalonnées par des générations de brevets C.F.T.H. à caractère général dont les applications nucléaires avaient été prévues.

L'existence de ces techniques exploitées sur les structures en cuivre a orienté la recherche des formes de structures qui devaient être essayées dans le cadre du contrat.

Le progrès le plus spectaculaire qui avait doublé les performances des VAPOTRON électroniques (6) consistait à réduire les intervalles à des fentes étroites et profondes entre des éléments dissipatifs dont la longueur b et la largeur a , étaient établies en fonction de la conductibilité λ du matériau selon l'expression

$$b = m \sqrt{a \lambda}$$

m étant un coefficient très voisin de l'unité avec une valeur caractéristique égale à 1,25.

Dans le cadre du contrat un essai sur échantillon d'abord en cuivre sous la pression atmosphérique puis en acier inoxydable sous pression variable jusqu'à 70 bars a confirmé que cette disposition permet d'abaisser notablement la résistance thermique de la structure dans toute l'étendue du domaine des pressions, notamment pour 70 bars. Une structure en acier inoxydable telle que $a = 0,17$ cm, $b = 0,3$ cm avec un intervalle de 0,1 cm présente une résistance thermique inférieure à $0,2^{\circ}$ C. cm^2/W jusqu'à une puissance de $600 \text{ Watt}/\text{cm}^2$ (Figure 8), résultat identique à celui constaté sur un VAPOTRON électronique en cuivre utilisant le même type de structure sous la pression atmosphérique.

2. DEFINITION DES GAINES VAPOTRON

Les difficultés rencontrées lors de la mise au point de la boucle ayant obligé à réduire le programme d'essai, ceux-ci ont porté essentiellement sur une série homogène dont le profil est défini par des figures triangulaires à 60° .

Toutes ces gaines, ainsi que la gaine cylindrique de référence possèdent la même masse de métal (figure 9).

L'une des gaines (18 dents) comporte des éléments dissipatifs correspondant aux essais effectués sur échantillons. Toutes les autres séries comportent des éléments de dimension réduite qui offrent toujours une surface développée approximativement égale au double de la surface mouillée de la gaine cylindrique lisse de référence.

Le but de cette série d'essais était de rechercher la limite de dimensions compatibles avec l'effet VAPOTRON.

Sur demande de Monsieur MORIN (EURATOM-C.C.R.-ISPRA) la série d'échantillons qui comportait initialement des modèles de 18, 24 et 36 ailettes, a été complétée par des modèles à 72 et 108 ailettes qui à priori semblaient dépasser les possibilités intrinsèques de stabilisation du phénomène VAPOTRON.

V - EXPERIMENTATION EN CONVECTION FORCEE

Le programme de recherches se poursuit par l'étude, la réalisation et la mise au point d'une boucle et d'une cellule d'essai en vue de l'expérimentation à 70 bars de gaines VAPOTRON de sections réalistes.

La figure 10 représente le schéma de principe de la boucle utilisée.

La réalisation de la cellule d'essais (figure 11) nécessite l'étude et la mise au point des dispositifs originaux suivants :

- . Système de chauffage indirect
- . Mesures des températures
- . Télévisualisation
- . Détecteur de burn-out.

1. SYSTEME DE CHAUFFAGE INDIRECT (voir Annexe A 1)

Le chauffage direct par effet Joule dans la masse de la gaine, tel qu'il est utilisé dans l'étude des gaines cylindriques lisses ne permet pas de reproduire le champ thermique réel dans le cas de gaines munies de corrugations VAPOTRON. C'est pourquoi nous avons développé un système de chauffage indirect qui représente au mieux la génération de chaleur du combustible nucléaire dans sa gaine.

Ce système de chauffage comprend des éléments cylindriques en graphite usinés avec une grande précision, enduits d'un isolant électrique, rectifiés puis ajustés dans l'alésage de la gaine

d'essai. Ces éléments chauffants sont alimentés sous basse tension.

Les difficultés principales suivantes furent résolues lors de la mise au point du système de chauffage :

- Isolement électrique entre l'élément chauffant et la gaine métallique
- Réalisation de liaisons électriques d'alimentation efficaces
- Obtention de l'étanchéité du dispositif par rapport au fluide refroidisseur sous pression

L'étude détaillée relative au chauffage indirect des gaines par simulation du combustible nucléaire figure en annexe. A1

2. MESURES DES TEMPERATURES (7)

Une étude comparative des procédés de mise en place des thermocouples de mesures des températures dans une gaine VAPOTRON a tout d'abord été réalisée en laboratoire. Une méthode originale de mesure des températures dans une paroi mince de faible conductivité thermique a été ensuite mise au point. Le thermocouple est logé puis serti dans une saignée de manière à obtenir un contact thermique optimal. Ce procédé présente l'avantage d'éliminer l'influence des vibrations mécaniques qui résultent de l'écoulement en convection forcée dans le canal.

Cette méthode de mise en place du thermocouple permet notamment de loger des thermocouples de 0,05 cm de diamètre dans une paroi de gaine de 0,075 cm d'épaisseur sans aucune déformation.

3. TELEVISUALISATION

Au cours des expériences effectuées sur des bancs d'essais en laboratoire, des dispositifs de visualisation par hublots avaient été utilisés. Pour les expérimentations en convection forcée à haute pression, il a été jugé important de pouvoir observer la surface d'échange des gaines VAPOTRON essayées.

Le corps de la cellule d'essais a été muni de trois dispositifs porte hublots situés à des niveaux différents, permettant d'observer les régions extrêmes et médiane de la gaine (Figure 12).

L'observation directe étant interdite pour des raisons de sécurité, le moyen qui a été retenu est constitué par un ensemble de télévision industrielle dont le coffret de commande à distance de la caméra ainsi que le récepteur, sont situés dans la salle de mesure.

L'éclairage de la gaine est assuré par des lampes étanches spéciales résistantes à la corrosion et aux chocs thermiques, placées directement à l'intérieur de la cellule d'essais.

La réalisation de ce montage a nécessité la résolution d'un certain nombre de problèmes concernant notamment l'encombrement ainsi que les conditions de pression, de corrosion et d'étanchéité.

4. DETECTEUR DE "BURN OUT" (voir Annexe A 2)

Le détecteur de "burn-out" a pour but d'éviter la destruction de la section d'essais en provoquant la coupure de son alimentation électrique par l'intermédiaire d'un disjoncteur à coupure rapide.

Le détecteur à thermocouples dont l'utilisation a d'abord été tenté, n'a pas permis d'obtenir des valeurs de "burn-out" sans destruction de gaine. Le système de détection finalement retenu est du type optique à cellule photo-résistante. Ce détecteur est basé sur la variation importante de la résistance électrique d'une cellule photo-résistante sous l'effet du rayonnement correspondant au "rouge naissant" (longueur d'onde voisine de 0,84 micron).

La température limite d'emploi des cellules photo-résistantes étant de 60° C, il a été nécessaire de les placer dans un compartiment obscur extérieur refroidi par circulation d'eau (Figure 11). La combinaison d'un conduit optique en quartz et d'un doublet, permet de concentrer sur la surface de la photo-résistance, la lumière issue de la section d'essais.

Ce type de détecteur de "burn-out" s'est avéré d'un fonctionnement tout à fait satisfaisant, contrairement à ce qu'on aurait pu croire d'après les résultats obtenus par ailleurs.

VI - RESULTATS OBTENUS EN CONVECTION FORCEE

1. CONDITIONS D'EXPERIMENTATION

Les résultats qui sont présentés ici ont été obtenus suivant les conditions d'expérimentation suivantes :

- Type de gaines (Figure 9)
 - . gaine de référence lisse
 - . série de gaines VAPOTRON munies d'ailettes de section triangulaire.

NOMBRE D'AILETTES	18	24	36	72	108
HAUTEUR D'AILETTES en cm	0,25	0,178	0,113	0,054	0,033

- Longueur des gaines : 50 cm
- Diamètre extérieur moyen de la gaine : 1,35 cm
- Diamètre intérieur du canal d'écoulement : ϕ 2,45 cm et ϕ 3,6 cm
- Pression P du fluide comprise entre 62 bars et 72 bars
- Vitesse massique G
 - . comprise entre 37 et 218 g/cm².s pour le canal d'écoulement ϕ 2,45 cm
 - . comprise entre 16 et 53 g/cm².s pour le canal d'écoulement ϕ 3,6 cm
- Titre thermodynamique à l'entrée X_e de la section d'essais :
 - . compris entre - 10,5 % et - 0,1 %
- Titre à la sortie X_S compris entre 10 % et 25 %.

2. PARAMETRE D'INTERPRETATION

Les mesures effectuées ont pour but de comparer directement les performances des gaines VAPOTRON avec une gaine cylindrique lisse. Ces performances étant mesurées par le flux thermique spécifique maximal en watt/cm² transmis par la gaine, le paramètre de comparaison est la surface d'échange équivalente de la gaine VAPOTRON. Après avoir cherché une surface équivalente qui soit la plus représentative possible des conditions physiques rencontrées dans un

un réacteur nucléaire notamment en ce qui concerne le bilan neutronique nous avons choisi la définition suivante :

La surface d'échange équivalente d'une gaine munie de corrugation VAPOTRON est la surface d'échange de la gaine cylindrique lisse qui aurait même masse et même diamètre intérieur.

3. RESULTATS

Le système de coordonnées dans lequel sont donnés les résultats, est celui généralement adopté pour transcrire les résultats de "burn-out", représentés en fonction du titre en masse de vapeur à la sortie, pour différentes valeurs des paramètres de vitesse massique et de sous-saturation.

Comme l'ont fait d'autres expérimentateurs (C.I.S.E. par exemple), les résultats sont également présentés en fonction du titre thermodynamique à l'entrée.

Les points de référence retenus pour la comparaison des résultats relatifs aux gaines VAPOTRON, ont été obtenus sur des gaines cylindriques lisses essayées dans les mêmes conditions expérimentales. En outre, une comparaison est faite avec des résultats de General Electric obtenus dans des conditions expérimentales voisines.

Ces derniers sont en bon accord avec les résultats THOMSON obtenus sur gaines cylindriques lisses.

Enfin, l'application à l'ensemble des points de B.O., d'une récente corrélation établie par C.I.S.E. (Italie) (9) a permis de voir que les résultats obtenus sur gaines VAPOTRON pouvaient être valablement reliés aux paramètres d'expérience imposés, moyennant une convention de définition relative au périmètre chauffant.

L'interprétation des 70 valeurs de "burn-out" relevées, conduit aux remarques suivantes :

3.1 Définition du gain :

Dans les comparaisons des résultats qui vont suivre, le gain sera défini, pour un même titre de vapeur en sortie, par le rapport

du flux de "Burn-out" mesuré sur gaines VAPOTRON, au flux de "Burn-out" obtenu sur les gaines cylindriques lisses.

$$\text{GAIN } \varphi_{(\chi_5 = \overline{c_{Te}})} = \frac{\varphi_{\text{B.O. VAPOTRON}}}{\varphi_{\text{B.O. CYLIND. LISSE}}}$$

3.2 Effets de "Pulsating Régime" :

Dans le tracé des valeurs de flux de B.O. en fonction du titre en vapeur à la sortie de la cellule (Fig. 13-14-15), des variations anormales ont été relevées dans certains flux critiques croissant en même temps que le titre.

Des résultats semblables ont déjà été mentionnés dans des publications russes et italiennes et le C.I.S.E., en particulier, a tenté d'analyser les phénomènes qui sont à l'origine de ces anomalies (5).

Ces phénomènes sont d'origine hydrodynamique et directement liés avec la conformation de la boucle et les pertes de charges dans la boucle et la cellule d'essais.

Ils ont reçu le nom de "Pulsating Régime".

Si on considère les courbes $\varphi_{\text{B.O.}} = f(\chi_e)$ (χ_e : titre thermodynamique à l'entrée de la cellule) (Figure 13-14 et 15), on s'aperçoit que les valeurs de flux critiques diminuent très rapidement au voisinage de $\chi_e = 0\%$, et que cette tendance est particulièrement marquée pour les gaines à faible hauteur de corrugations (gaines striées) (figure 15).

Aucune autre conclusion ne peut être tirée pour le moment, de ces remarques concernant le "Pulsating régime", que celle qui consiste à dire que les points relevés en présence de ces phénomènes, ne constituent pas des valeurs utilisables et ne peuvent être pris en considération pour la comparaison avec les gaines cylindriques lisses.

3.3 Tableaux de résultats :

3.3.1 Le tableau 16 donne les paramètres principaux et les flux de B.O. mesurés sur les différentes gaines.

3.3.2 Les tableaux de la figure 17 donnent les gains définis comme il est dit en 3-1, pour des gaines munies de corrugations de types différents.

La figure 18 regroupe ces résultats dans le système de coordonnées $Q = f(X_S)$, avec pour paramètre la vitesse massique G .

3.4. Application de la corrélation C.I.S.E. :

$$\frac{P_2}{q_1 \cdot r} = \left(\frac{P_i}{P_{tot}} \times \frac{1 - \frac{P}{P_{tot}}}{\left(\frac{G}{G_{00}}\right)^{1/3}} - x_e \right) \frac{L}{L + 0,315 \left(\frac{R_r}{P} - 1 \right)^{0,4} \cdot D_{p,r}^{1,4} \cdot G}$$

3.4.1 Gaines cylindriques lisses -

Les valeurs mesurées sur gaines cylindriques lisses obtenues dans le cadre de cette étude se situent toutes dans la marge $\pm 15\%$ de la corrélation.

De cette remarque, sachant qu'un grand nombre de résultats obtenus sur gaine cylindrique avec chauffage direct satisfait la corrélation ci-dessus, on peut déduire que le mode de chauffage ne semble pas avoir une importance significative sur les valeurs de flux de "burn-out" mesurées.

3.4.2 Gaines corruguées -

Nous avons tenté d'appliquer la corrélation C.I.S.E. de deux manières, aux gaines corruguées.

La première consiste à utiliser comme périmètre chauffant dans le rapport $\frac{P_i}{P_{tot}}$ et dans le calcul de D_h , le périmètre réel de la gaine (ligne C du tableau de la figure 9).

La seconde utilise le périmètre du cylindre équivalent tel que nous l'avons défini au § 2.

La première méthode donne des écarts systématiques de la valeur expérimentale par rapport à la corrélation de -40% .

Ces résultats apparaissent sur la figure 19.

Si on utilise pour la définition des facteurs $\frac{P_i}{P_{tot}}$ et D_h les valeurs correspondant à la gaine cylindrique équivalente, la corrélation peut être vérifiée pour les points normaux.

La figure 20 donne les valeurs obtenues sur gaines VAPOTRON (18,24 et 36 ailettes) et sur gaines striées.

La corrélation C.I.S.E. modifiée semble satisfaite pour les différentes gaines VAPOTRON et pour les deux dimensions de canaux d'écoulement utilisées.

VII - ANALYSE DES RESULTATS

Le but de la présente étude était de déterminer le gain apporté par l'utilisation de gaines du type VAPOTRON dans les conditions d'un réacteur nucléaire à eau bouillante à la place des gaines cylindriques lisses classiques.

Il est intéressant de noter que les résultats obtenus après quelques mois d'expérimentation sont tous favorables, surtout si l'on tient compte du fait que les gaines VAPOTRON essayées ont été comparées à des gaines cylindriques lisses pour lesquelles un grand nombre d'expériences a pu être accumulé par de nombreux laboratoires.

Toutefois, ces résultats en convection forcée, sont moins spectaculaires que ceux qui avaient été obtenus en "pool boiling", sur des échantillons VAPOTRON élémentaires.

Il est bon de rappeler que, compte tenu du nombre limité de gaines essayées dans un temps d'expérimentation relativement court, aucune optimisation de gaine VAPOTRON n'a pu être faite tant en ce qui concerne le dimensionnement que le type de configuration. Nous allons cependant tenter d'examiner l'influence des différents paramètres considérés au cours de l'expérimentation en convection forcée.

1. GEOMETRIE DES GAINES

On rappellera que toutes les gaines essayées avaient la même définition de structure : ailettes à section triangulaire.

Dans la marge des hauteurs d'ailettes utilisées, de 0,25 cm à 0,033 cm, aucune discontinuité il n'y a dans les performances mesurées. Toutefois, il apparaît que les gaines à faible hauteur de corrugation présentent des performances élevées.

Cette expérimentation couvre ainsi un large éventail de géométries VAPOTRON, qui comprend même le domaine des gaines dans lesquelles il était à priori difficile de croire que l'effet VAPOTRON puisse encore se stabiliser.

Il est intéressant de rechercher une explication à ce fait paradoxal, que les performances des diverses structures semblent varier sans discontinuité dans l'ensemble du domaine des dimensions exploré.

Une explication peut être trouvée dans l'application d'une formule générale du VAPOTRON, issue des travaux entrepris par la Division Tubes Electroniques de la Compagnie Française THOMSON-HOUSTON. Après un rapport établi en 1963 et confirmé par une note à l'Académie des Sciences en Juillet 1964, (10), Monsieur BEURTHERET a abouti à une conception générale du VAPOTRON qui a fait l'objet d'un brevet déposé en Décembre 1964 et selon laquelle la longueur b caractéristique de l'élément dissipatif capable de stabiliser l'effet VAPOTRON dans un intervalle de température θ entre son extrémité et sa base est définie par l'expression.

$$b = k \frac{\lambda \theta}{\varphi_{B.O.}}$$

k étant un coefficient de forme peu supérieur à 1 et théoriquement égal à 1 dans le cas d'un profil en triangle isocèle et $\varphi_{B.O.}$ le flux de chaleur maximal transmissible par la structure ("burn-out").

Cette relation qui s'écarte peu de la loi de Fourier est justifiée par la conception très typique d'un régime hydrodynamique global assurant sur l'ensemble de la surface développée une densité de flux φ_1 considérée arbitrairement comme constante et indépendante de la température.

Une deuxième condition de dimensionnement exprime que la surface développée est par rapport à la surface de base dans un rapport au moins égal à $\frac{\varphi_{B.O.}}{\varphi_1}$.

Si l'on applique la relation $b = \frac{\lambda \theta}{\varphi_{B.O.}}$ aux diverses structures triangulaires essayées, on peut calculer les valeurs de l'écart de température mis en oeuvre pour chacune d'elle :

$$\theta = b \frac{\varphi_{B.O.}}{\lambda}$$

Nombre d'ailettes n	Longueur b cm	Flux total $\psi_{B.O.}$ w/cm ²	Ecart de température θ °C
18	0,25	320	470
24	0,18	280	290
36	0,11	320	210
72	0,05	270	85
108	0,03	280	55

Il apparaît à la suite de cette série d'expériences limitées à une seule forme de VAPOTRON non optimisée que le phénomène de stabilisation d'un gradient de température s'étendant au delà de la température critique d'ébullition, se trouve réalisé même sur des structures dont les dimensions sont plus faibles que celles dont on peut réellement envisager l'utilisation dans un réacteur à eau bouillante. En fait ce sont des stries profondes de l'ordre du mm qui doivent permettre de faire bénéficier les réacteurs d'une augmentation notable du coefficient de sécurité vis à vis du flux dont on peut réellement envisager l'utilisation.

Les conditions de circulation forcée, jusqu'à présent définies en fonction des possibilités d'échange thermique sur paroi isotherme pourraient être réduites dans le cas d'un emploi systématique de parois anisothermes travaillant dans la zone favorable du VAPOTRON qui tolère des titres de vapeur plus élevés.

2. PARAMETRES D'EXPERIMENTATION

Pour le cas des gaines cylindriques lisses, le nombre de paramètres à considérer étant déjà très important, il est encourageant d'avoir obtenu au cours de notre expérimentation sur des gaines du même type des résultats qui se recoupent avec ceux publiés par Général Electric.

Les principales grandeurs considérées au cours de l'expérimentation sont les suivantes : pression, diamètre hydraulique, vitesse massique, titre thermodynamique à l'entrée, titre et masse à la sortie et puissance de "burn out".

Le diamètre hydraulique D_h choisi initialement (2,24 cm) se situe à la limite de la marge optimale préconisée par Général Electric. Il faut toutefois noter que dans les deux cas qui nous intéressent ($D_h = 2,24$ cm et $D_h = 1,09$ cm), les performances obtenues avec les gaines VAPOTRON sont très sensiblement supérieures à celles relevées avec les gaines cylindriques lisses. En ce qui concerne l'influence du diamètre hydraulique sur les performances d'une gaine VAPOTRON donnée, il est impossible de formuler une opinion étant donné que pour le canal d'écoulement le plus grand, la plupart des points mesurés se situent dans une zone où se manifestait le "pulsating regime".

En ce qui concerne l'influence de la vitesse massique, on se rappelle que le gain par rapport aux gaines cylindriques lisses diminue lorsque celle-ci augmente. En fait, bien que les relevés soient insuffisamment nombreux, les valeurs obtenues sur les gaines VAPOTRON montrent que les flux de "burn out" ne sont pas sensiblement modifiés par la vitesse massique, du moins dans le domaine des faibles valeurs compris entre 35 et 90 g/cm².s. Dans cette marge, le titre en masse à la sortie passe de 25 % à 15 %. Ceci aurait tendance à montrer que plus les conditions de vitesse se rapprochent de celles de "poolboiling" plus l'efficacité du phénomène VAPOTRON est importante.

L'influence de la sous-saturation s'est surtout révélée dans l'apparition des phénomènes de "pulsating-regime". Comme il a déjà été signalé dans le cas du plus faible diamètre hydraulique, ces phénomènes se sont particulièrement manifestés pour les faibles hauteurs de corrugations. Il est permis de supposer que les corrugations VAPOTRON doivent présenter une hauteur suffisamment grande afin d'adjoindre à l'effet bénéfique du phénomène VAPOTRON, l'obtention d'une parfaite stabilité de fonctionnement par la suppression de phénomènes semblables au "pulsating regime".

VIII - CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

La première étape du programme de recherches consistait à vérifier que la diminution de la conductivité thermique du matériau de gainage permettait une réduction des dimensions des protubérances VAPOTRON, qui déjà en "POOL BOILING" étaient compatibles avec la géométrie de réseaux des réacteurs à eau bouillante connus.

C'est ce résultat fondamental obtenu au cours de l'expérimentation en "POOL BOILING" qui constitua la base nécessaire à la poursuite de l'expérimentation sur gaines réalistes.

Des flux thermiques supérieurs à 800 W/cm² furent ainsi maintenus d'une manière parfaitement stable en "POOL BOILING" sous une pression de 70 bars. Toutefois, dans ces conditions d'expérimentation, la température à la base de l'ailette était relativement élevée mais on espérait qu'en régime de convection forcée, cette température diminuerait notablement. L'application du procédé VAPOTRON aux combustibles nucléaires pour réacteurs à eau bouillante pouvait alors être sérieusement envisagée.

L'étude des différentes géométries VAPOTRON utilisables, montre que la présence d'une face frontale permet d'augmenter les performances tout en assurant une sécurité de fonctionnement plus grande.

Toutefois, l'existence de cette face frontale entraîne une augmentation du matériau de gainage et présente ainsi une difficulté d'adaptation dans le cas des réacteurs nucléaires.

Pourtant les essais effectués permettent de voir que les performances obtenues sur les dents de forme triangulaire sans face frontale, et sous des pressions relativement basses, inférieures à 20 bars, sont déjà très intéressantes.

C'est ainsi qu'à 19 bars ont atteint des valeurs de flux supérieures à 700 Watt/cm² pour des écarts de température de l'ordre de 260° C tout en étant très loin du décrochage.

Connaissant l'influence bénéfique de la pression, il apparaît donc possible d'obtenir à 70 bars, avec une telle géométrie, des performances élevées avec des dimensions très réduites et des températures à la base acceptables.

Cette forme triangulaire étant la plus compatible avec le volume minimal de matériau de gainage est retenue pour définir une famille de gaines destinées aux essais en boucle.

Au cours de la campagne d'essais en boucle qui est menée à la fin du programme de recherches, les performances des gaines VAPOTRON sont comparées à celles de gaines cylindriques lisses.

La série des points de mesures obtenus correspond toujours par rapport aux meilleurs résultats connus sur gaines isothermes (General Electric, Thomson) à un gain variable avec les conditions de débit imposées et qui peut dépasser²(jusqu'à 2,25 dans le cas de faibles vitesses massiques, Figure 17a).

Cette expérimentation couvre ainsi un large éventail de géométries VAPOTRON, qui s'étend jusqu'au domaine des gaines striées dans lesquelles il était à priori difficile de croire que l'effet VAPOTRON puisse encore se stabiliser. Aucune discontinuité n'a pourtant été observée dans l'ensemble du domaine exploré, qui met en oeuvre une surface d'échange accrue et suffisamment anisotherme.

L'ensemble des résultats a permis de confirmer que l'utilisation de gaines VAPOTRON dans un réacteur nucléaire bouillant n'est pas incompatible avec les différentes conditions de construction et d'exploitation de ce réacteur. Au premier chef, le gain obtenu n'est pas à négliger en vue d'une augmentation éventuelle de puissance.

D'un autre point de vue, il n'est pas impossible que des gaines munies de nervures longitudinales du type VAPOTRON présentent un facteur de stabilité hydrodynamique plus grand que les gaines cylindriques lisses. Toutefois, des essais complémentaires seraient nécessaires pour vérifier cette hypothèse.

Il faut remarquer que notre programme d'essais des gaines VAPOTRON en circulation forcée a été très limité et n'a pas comporté de recherches d'optimisation des formes ni des conditions d'expérimentations.

Par ailleurs, les problèmes de performances aussi bien que ceux de stabilité, n'ont pas été étudiés dans le cas des gaines VAPOTRON disposées en grappes.

Si l'on se réfère aux résultats obtenus sur grappes par d'autres expérimentateurs, on a tout lieu de penser que l'utilisation de grappes VAPOTRON devrait aussi permettre d'atteindre des performances sensiblement supérieures à celles obtenues sur des gaines corruguées uniques en géométrie annulaire.

En fin de contrat, il a été déposé une demande de brevet couvrant l'emploi de barreaux combustibles munis d'un gainage, comportant des nervures triangulaires jointives, dont la hauteur est comprise entre 0,03 cm et 0,2 cm (11).

Il semble que des nervures de dimensions comprises entre 0,06 cm et 0,12 cm soient particulièrement intéressantes. En fait, cette gamme de dimensions, appliquées à un gainage en acier inoxydable ou en zircalloy, correspond effectivement à un rapport d'homothétie égal au rapport des conceptions, par rapport aux structures VAPOTRON en cuivre couramment utilisées dans les tubes électroniques.

LISTE DES SYMBOLES

a ,	Largeur d'une ailette élémentaire	cm
l ,	Longueur	cm
D_h ,	Diamètre hydraulique	cm
G ,	Vitesse massique dans le canal d'écoulement en convection forcée	$g/cm^2 \cdot s$
k ,	Coefficient dans l'expression	$h = k \frac{\Delta \theta}{\varphi_{B.O.}}$ cm
L ,	Longueur chauffée d'une gaine	
m ,	Coefficient dans l'expression	$h = m \sqrt{a \cdot \lambda}$
n ,	Nombre d'ailettes d'une gaine	
P_i ,	Périmètre chauffant d'une gaine	cm
P_{tot} ,	Périmètre mouillé total d'une gaine	cm
P ,	Pression	bars
P_{cr} ,	Pression critique du fluide	bars
P_g ,	Puissance	W
q_1 ,	Débit du fluide dans le canal d'écoulement en convection forcée	g/s
r ,	Chaleur latente de vaporisation	J/g
x_e ,	Titre thermodynamique à l'entrée de la cellule d'essais	
x_s ,	Titre en masse, de vapeur à la sortie de la cellule	

η	, Gain des gaines vapotron par rapport aux gaines cylindriques lisses	
θ	, Ecart de température entre la base et la pointe d'une ailette	$^{\circ}\text{C}$
$\Delta\theta_f$, Ecart de température entre la base d'une ailette et la température de saturation du fluide	$^{\circ}\text{C}$
λ	, Conductivité thermique du matériau d'ailette	$\text{W}/\text{cm}, ^{\circ}\text{C}$
φ	, Densité de flux thermique	W/cm^2
$\varphi_{B.O.}$, Densité de flux thermique critique	W/cm^2

*

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- (1) C.A. BEURTHERET "Les processus de vaporisation et le VAPOTRON". Journées de la transmission de la chaleur. Institut Français des Combustibles et de l'Energie - PARIS - JUIN 1961.
- (2) C.A. BEURTHERET - "L'ébullition à flux imposé sur paroi non isotherme". VIIe Journées de l'hydraulique. Société Hydrotechnique de France - PARIS - JUIN 1962.
- (3) Brevet Français N° 1.126.414 du 16 FEVRIER 1955.
"Perfectionnement aux réacteurs nucléaires".
Invention C.A. BEURTHERET.
- (4) Revue Technique C.F.T.H. N° 38. MAI 1963.
"Le VAPOTRON nucléaire" par Ph. DEMANGE, E. DOUGUET et J.D. LEFRANC.
- (5) Revue Technique C.F.T.H. N° 24. DECEMBRE 1956.
"La technique des VAPOTRONS" par C.A. BEURTHERET.
- (6) Brevet Français N° 1.344.216 du 23 FEVRIER 1962.
"Perfectionnements apportés aux parois d'échange de chaleur et aux dispositifs comportant de telles parois". Invention C.A. BEURTHERET.
- (7) Rapport technique particulier N° 2. (Contrat N° 050-62- 5 RDC).
"Méthode originale d'utilisation de thermocouples pour la mesure des températures de surface". par E. DOUGUET
- (8) E. JANSSEN, J.A. KERVINEN.
Burnout conditions for single rod in annular geometry, water at 600 to 1.400 psia. GEAP 3.899, February 1963.
- (9) Energia Nucleare. Vol 12 N° 3. MARS 1965 P. 121-172.
"Heat Transfer crisis with steam-water mixtures"
S. BERTOLETTI, G.P. GASPARI, C. LOMBARDI, G. PETERLANGO,
M. SILVESTRI, F.A. TACCONI. C.I.S.E. Milano.

- (10) C.R. Acad. Sc. PARIS, t. 259 p. 519-522 (20 juillet 1964)
Thermocinétique - "Vaporisation en régime complexe d'un liquide baignant une paroi chaude essentiellement anisotherme". Note de Monsieur Charles BEURTHERET, transmise par Monsieur Albert CAQUOT.
- (11) Demande de Brevet Français déposée le 17 décembre 1964 sous le numéro P.V. 999.075 sous le titre "Perfectionnements aux parois d'échange de chaleur et aux dispositifs comportant de telles parois"
Invention C.A. BEURTHERET.
- (12) Brevet Belge n° 20.139 du 10 novembre 1965.
* Procédé et dispositifs pour augmenter le flux thermique critique d'une paroi en contact avec un liquide en ébullition"
Invention de E. DOUGUET et R. MORIN.

TABLE DES MATIERES

Chapitre I : INTRODUCTION

Chapitre II : HISTORIQUE

Chapitre III : EXPERIMENTATIONS EN "POOL BOILING"

1. Rappel du principe VAPOTRON.
2. Loi d'homothétie entre les paramètres géométriques et la conductivité thermique du métal.
3. Loi de pression.
4. Conclusion des premiers essais en "pool boiling".

Chapitre IV : DETERMINATION DE LA GEOMETRIE DES STRUCTURES VAPOTRONS

1. Géométrie de l'élément dissipatif VAPOTRON.
2. Définition des gaines VAPOTRON.

Chapitre V : EXPERIMENTATION EN CONVECTION FORCEEE

1. Système de chauffage indirect.
2. Mesures des températures.
3. Télévisualisation.
4. Détecteur de burn-out.

Chapitre VI : RESULTATS OBTENUS EN CONVECTION FORCEEE

1. Conditions d'expérimentation.
2. Paramètre d'interprétation.

3. Résultats

3.1 Définition du gain

3.2 Effets du "Pulsating régime"

3.3 Tableaux de résultats

3.4 Application de la corrélation de C.I.S.E.

Chapitre VII : ANALYSES DES RESULTATS

1. Géométrie des gaines.

2. Paramètres d'expérimentation.

Chapitre VIII : CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

LISTE DES SYMBOLES

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

ANNEXE A 1 : Chauffage indirect de gaines par simulation du combustible nucléaire.

ANNEXE A 2 : Détecteurs de burn-out.

TABLE DES FIGURESAPPLICATION DU PROCEDE VAPOTRON AUX REACTEURS NUCLEAIRES A EAU BOUILLANTE.

- (1) Banc d'essai d'échantillons élémentaires à la pression atmosphérique
- (2) Banc d'essai sous basse pression pour éléments de gaines courts
- (3) Coexistence des divers régimes d'ébullition sur une ailette VAPOTRON
- (4) Dimensionnement des échantillons de natures différentes dans le rapport des conductivités thermiques
- (5) Courbe $\varphi_e = f(\Delta\theta_e)$ pour un échantillon de profil rectangulaire
- (6) Distribution de températures le long d'un échantillon VAPOTRON en acier inoxydable de dimensions 0,56 x 0,17 cm à la pression de 30 bars
- (7) Echantillon en acier inoxydable de 0,30 x 0,17 cm. Courbes $\varphi_e = f(\Delta\theta_e)$ pour diverses valeurs de pressions comprises entre la pression atmosphérique et 70 bars
- (8) Echantillons en acier inoxydable de 0,3 x 0,17 cm. Amélioration due au canal inter-dents
- (9) Tableau comparatif des sections des gaines
- (10) Schéma de principe de la boucle d'essais à 70 bars
- (11) Coupe de la cellule d'essais
- (12) Système de télévisualisation
- (13) Résultats comparés des gaines corruguées et des gaines cylindriques lisses
 $37 < G < 46 \text{ g/cm}^2.\text{s}$

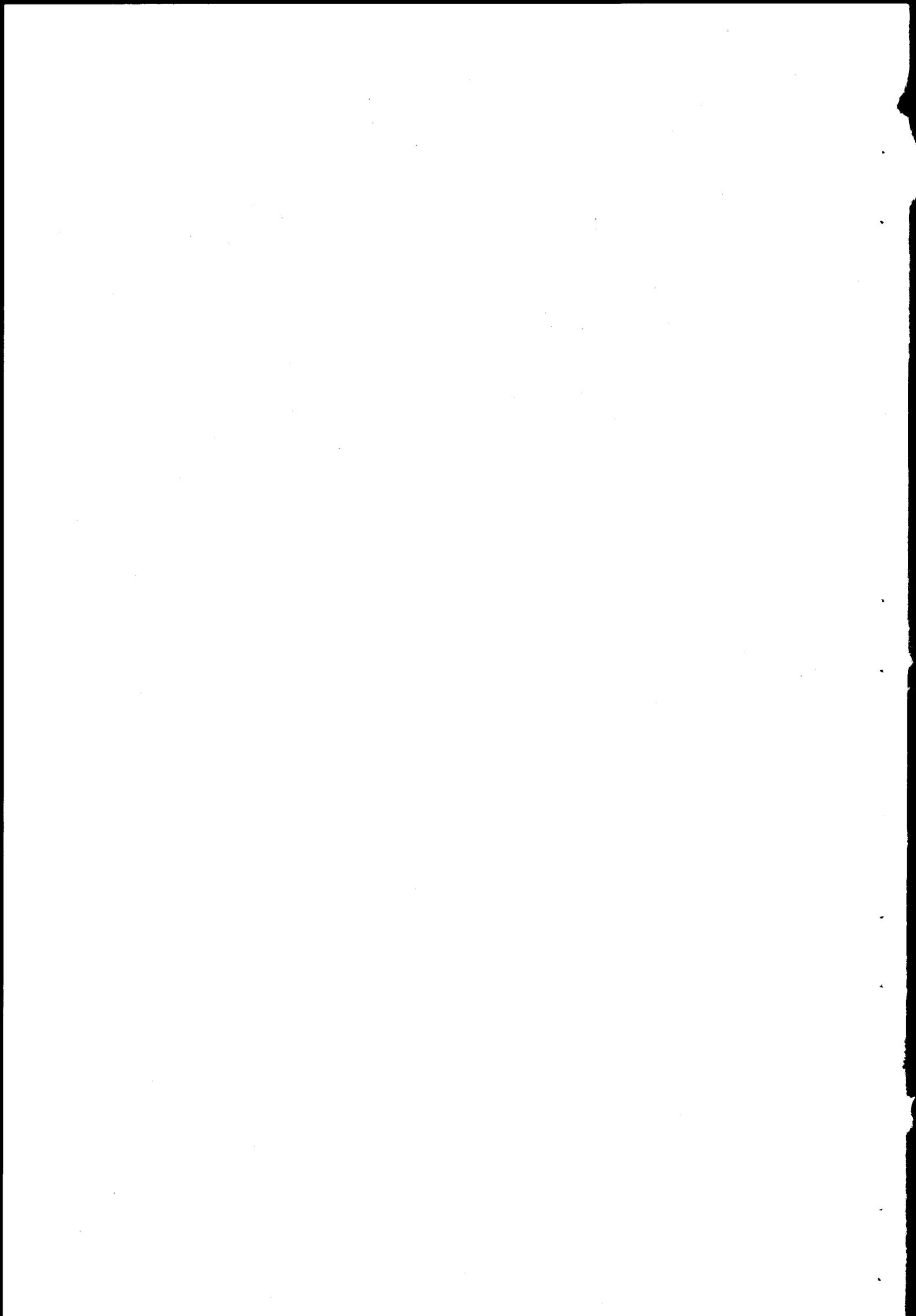
- (14) Résultats comparés des gaines corruguées et des gaines cylindriques lisses $46 < \hat{G} < 58 \text{ g/cm}^2 \text{ s}$
- (15) Résultats comparés des gaines corruguées et des gaines cylindriques lisses $70 < \hat{G} < 88 \text{ g/cm}^2 \text{ s}$
- (16) Tableau récapitulatif des valeurs de B.O.
- (17) Tableau des gaines corruguées :
- | | | | |
|------|-------|---------|----------------------|
| 17 a | | G = 40 | g/cm ² s. |
| 17 b | | G = 55 | g/cm ² s. |
| 17 c | | G = 80 | g/cm ² s. |
| 17 d | | G = 110 | g/cm ² s. |
- (18) Gain des gaines corruguées
- (19) Application de la corrélation de C.I.S.E.
- (20) Application de la corrélation de C.I.S.E. modifiée

ANNEXE A1 : Chauffage indirect de gaines par simulation du combustible nucléaire

- A1.1 Différentes phases de réalisation de l'élément chauffant
- A1.2 Vues en coupe de l'élément chauffant en cours de fabrication
- A1.3 Montage de la traversée électrique étanche

ANNEXE A2 : Détecteurs de burn-out

- A2.1 Schéma de principe du détecteur de B.O. à thermocouple.
- A2.2 Face avant du "coffret Amplification et transmission du signal" du détecteur de B.O.
- A2.3 Vue intérieure du coffret ci-dessus.
- A2.4 Schéma de principe des circuits internes du coffret.
- A2.5 Schéma de câblage.
- A2.6 Temps de réponse - détecteur de B.O. - C.F.T.H.
- A2.7 Burn-out obtenu malgré la présence du thermocouple de détection.
- A2.8 Schéma de principe du détecteur de B.O. à cellules photorésistantes.
- A2.9 Coupe du compartiment optique support de la cellule photorésistante
- A2.10 Vue d'une cellule photorésistante sur son support, et compartiment optique monté.
- A2.11 Schéma de principe de l'adaptateur d'impédance.
- A2.12 Vue de l'adaptateur d'impédance.



A N N E X E A 1

CHAUFFAGE INDIRECT DE GAINES
PAR SIMULATION DU COMBUSTIBLE NUCLEAIRE

L'étude de l'application du procédé VAPOTRON au transfert de chaleur dans les réacteurs nucléaires à eau bouillante à nécessité l'utilisation d'un mode de chauffage différent de celui classiquement adopté pour de telles études. En effet, si le chauffage direct par effet Joule, d'un tube à section annulaire est facilement réalisable sans grande perturbation de l'échange thermique sur les parois de ce tube, il n'en est plus de même, dans le cas d'un tube, à section irrégulière (paroi d'épaisseur variable) comme celle d'une gaine "VAPOTRON".

Nous avons donc été conduits à mettre au point un système de chauffage indirect auquel, par ailleurs, nous avons cherché à donner la forme la plus proche possible de celle du combustible nucléaire placé dans sa gaine.

La méthode retenue consiste à placer un cylindre de graphite, dans l'alésage de la gaine à essayer thermiquement, comme le montrent les figures 1 et 2, et à alimenter électriquement cet élément en graphite sous basse tension.

L'étude d'un tel dispositif pose plusieurs problèmes de technologie relatifs :

- au choix de la nuance de graphite,
- à l'usinage du graphite et de l'alésage de la gaine, compte tenu des dimensions choisies,
- à l'isolement électrique du graphite par rapport à la gaine essayée,
- à la liaison des conducteurs d'amenée de courant avec la résistance en graphite,
- à l'étanchéité à assurer aux extrémités de la gaine par rapport au milieu (eau) dans lequel elle baigne.

1. CHOIX DU GRAPHITE

Plusieurs critères orientent le choix du graphite.

- a) Selon que l'on possède déjà une source d'alimentation électrique ou qu'il faille la déterminer pour l'application envisagée, le choix de la résistivité sera plus ou moins facile. Notre cas appartenait à la première catégorie et comme par ailleurs les dimensions des gaines

étaient imposées, la résistance, donc la valeur de la résistivité du graphite à utiliser, était définie de manière impérative.:

$$R = \frac{U}{I} = \rho \frac{l}{s}$$

d'où

$$\rho = \frac{U}{I} \times \frac{s}{l}$$

La valeur de ρ dans le cas de notre expérimentation, fut donc de $1.000 \mu\Omega \cdot \text{cm}$. Cette valeur correspond à des nuances de graphite courantes (par exemple, qualité CS de SAVOIE-ACHESON ; qualité 5 501 de CARBONE-LORRAINE...).

- b) A valeur de résistivité identique, le choix doit se porter sur un graphite fin qui possède des caractéristiques mécaniques plus élevées. La recherche de la résistance à la traction la plus grande est utile, car lors du chauffage, le graphite dont le coefficient de dilatation est relativement faible, risque d'être soumis à un effort de traction engendré par la dilatation différentielle du montage gaine-graphite-amenées de courant.

Il est toutefois intéressant de rappeler que la résistance à la rupture du graphite, augmente d'environ 80 % en fonction de la température entre 0 et 2 500°C.

- c) Par nature, le graphite ordinaire est un matériau poreux, et lors de sa fabrication il est concevable que les criques internes ou des retassures puissent y prendre naissance sous l'effet de gaz occlus (air, impuretés volatiles). Ces défauts détériorent l'homogénéité du matériau et sont nuisibles d'une part à la bonne tenue mécanique, et d'autre part à l'uniformité de la densité de courant dans la section droite de l'élément chauffant c'est-à-dire susceptibles de créer des zones de dissipation thermique variable.

Nota : Les résistivités des graphites courants varient entre 500 et $4\ 000 \mu\Omega \cdot \text{cm}$. La qualité 730 de Carbone Lorraine est donnée pour

$$\rho = 3\ 600 \mu\Omega \cdot \text{cm}.$$

Certains fabricants fournissent des qualités de graphite garanti contre tout défaut de structure interne (qualités ATJ et AGMT, de SAVOIE ACHESON, par exemple).

2. LIMITE D'UTILISATION

Une limitation de la densité de courant admissible dans une barre de graphite est fixée par la température au centre de la barre qui doit rester inférieure à la valeur de la température de sublimation pour laquelle l'augmentation de la tension de vapeur interne serait telle qu'elle provoquerait l'explosion de la barre.

La formule suivante permet de déterminer la valeur maximale de densité de courant :

$$\left(\frac{I}{s}\right) = \frac{61}{d \sqrt{\rho}}$$

$\left(\frac{I}{s}\right)$: densité de courant, en $\frac{A}{cm^2}$

d : diamètre de la barre, en cm

ρ : résistivité de la barre à 2 200°C, en $\Omega \cdot cm$.

L'application de cette formule à notre cas, donne :

$$\left(\frac{I}{s}\right) \sim 2\,470 \frac{A}{cm^2}$$

ce qui nous autorise une intensité de 1 850 A.

3. REALISATION DES ELEMENTS CHAUFFANTS

La nécessité d'obtenir la plus grande homogénéité possible dans l'échange thermique entre la gaine essayée et la résistance, implique une réalisation précise de l'alésage de la gaine d'une part, et du cylindre en graphite d'autre part. On pourra juger des difficultés techniques rencontrées pour l'obtention de ces conditions, si l'on se souvient des dimensions des différents éléments. En effet, la réalisation d'un alésage de ϕ 10 mm et de longueur 500 mm dans de l'acier inoxydable avec des tolérances de $\pm 0,01$ sur le diamètre, se réclame d'une technique d'armurier, et la réalisation d'un cylindre de graphite de dimensions voisines et avec les mêmes conditions de tolérance d'usinage ne se fait pas sans difficultés étant donnée la nature du matériau.

4. ISOLEMENT ELECTRIQUE DE L'ELEMENT CHAUFFANT PAR RAPPORT A LA GAINE

ESSAYEE

L'isolement électrique est assuré par un revêtement d'alumine (Al_2O_3) obtenu par schoopage au pistolet, en partant de baguettes d'alumine de $\varnothing \approx 2,5$ mm. Préalablement, afin de permettre une meilleure adhérence de la couche d'alumine sur le graphite, il est nécessaire de procéder à un sablage fin de la paroi en graphite. L'épaisseur déposée est d'environ 0,2 mm. Elle est obtenue d'une manière uniforme en faisant l'opération sur un tour où le pistolet est charioté à vitesse constante pendant que le cylindre de graphite tourne.

L'épaisseur d'alumine est ensuite portée à 0,15 mm par rectification. Cette opération est très délicate à conduire étant données la dureté de l'alumine et la fragilité du support en graphite.

La figure 1 montre quatre stades de réalisation d'un élément chauffant :

- a) barreau de graphite brut dans lequel est usinée la résistance,
- b) résistance usinée,
- c) schoopage d'alumine, dont on a cassé une partie pour en montrer l'épaisseur,
- d) résistance terminée, munie de ses embouts métalliques ;

la figure 2 montre la coupe de tels éléments chauffants isolés, rectifiés.

Le matériau d'isolement retenu (Al_2O_3) n'est peut-être pas le meilleur en particulier à haute température ; cependant comme les tensions d'utilisation sont faibles nous n'avons jamais eu d'ennuis provoqués par la diminution de ses qualités diélectriques.

Nous avons craint aussi une réaction, en particulier à haute température, entre le carbone et l'alumine, mais l'expérience nous a montré un bon comportement d'un tel ensemble.

Il n'est pas dit pour autant que ce comportement se maintiendrait pour des essais de très longue durée.

Nous pensons utiliser un autre matériau de revêtement, le nitrure de bore, qui présente par rapport à l'alumine de nombreux avantages :

- très bonnes propriétés diélectriques à haute température,
- meilleure conductivité thermique (4 fois meilleure que Al_2O_3 , à 1 000° C.),
- résistance aux chocs thermiques,
- très bonne compatibilité avec le carbone,
- meilleure qualité d'adhérence sur le graphite,
- facilité d'usinage plus grande.

Malheureusement, ce matériau réagit et se décompose avec l'eau, en donnant de l'ammoniac et de l'acide borique, ce qui dans notre cas d'utilisation, nécessitera des dispositifs d'étanchéité sérieux aux extrémités de la résistance et de la gaine.

5. ALIMENTATION ELECTRIQUE DE L'ELEMENT CHAUFFANT

Le montage initial prévoyait des conducteurs en cuivre comportant une empreinte tronconique profonde qui recevait l'extrémité de l'élément en graphite usinée en forme de tronc de cône avec le même angle au sommet. Un des conducteurs en cuivre constituait un point fixe, et l'autre comportait un système élastique dont l'effet ressort était suffisant pour assurer un bon contact graphite-conducteur.

Ce dispositif s'est avéré, à l'usage, très délicat et des difficultés sont apparues dues à des échauffements intempestifs provoqués par les résistances de contact graphite-cuivre, qui ne sont pas négligeables par rapport à la résistance propre de l'élément chauffant.

Quelques autres solutions utilisant un contact mécanique ont été essayées, mais n'ont pas donné satisfaction pour des intensités supérieures à 1 000 A. Deux autres solutions, en cours d'essais utilisant, l'une un frettage à chaud d'un embout en cuivre sur le graphite, l'autre un brasage de l'embout en cuivre sur une couche de cuivre préalablement déposée sur le graphite, permettent d'augurer de meilleurs résultats.

La figure 1 d montre une résistance munie de ses embouts en cuivre, montés par frettage.

6. ETANCHEITE AUX EXTREMITES DE LA GAINE

Dans les premiers montages, des infiltrations d'eau, sous forme liquide ou sous forme de vapeur, ont provoqué des corrosions internes dans les zones intermédiaires, non recouvertes d'alumine aux extrémités

de la barre de graphite. A haute température, en quelques heures, la corrosion était si importante que sa section était réduite à quelques mm², se rompait en amorçant un arc électrique qui provoquait la fusion de la gaine.

Il a donc fallu rechercher un moyen d'étanchéité suffisamment sérieux pour éviter toute arrivée d'eau au contact du graphite.

Le dispositif actuel, qui peut-être amélioré, consiste à utiliser un tube en téflon serré sur l'extrémité de la gaine essayée, et sur la pièce d'amenée de courant en cuivre, par l'intermédiaire de colliers ou de bagues en acier inoxydable. Le montage est réalisé de manière à utiliser le fluage du téflon pour compenser la dilatation différentielle gaine-élément chauffant.

La figure 3 donne une idée d'un tel montage.

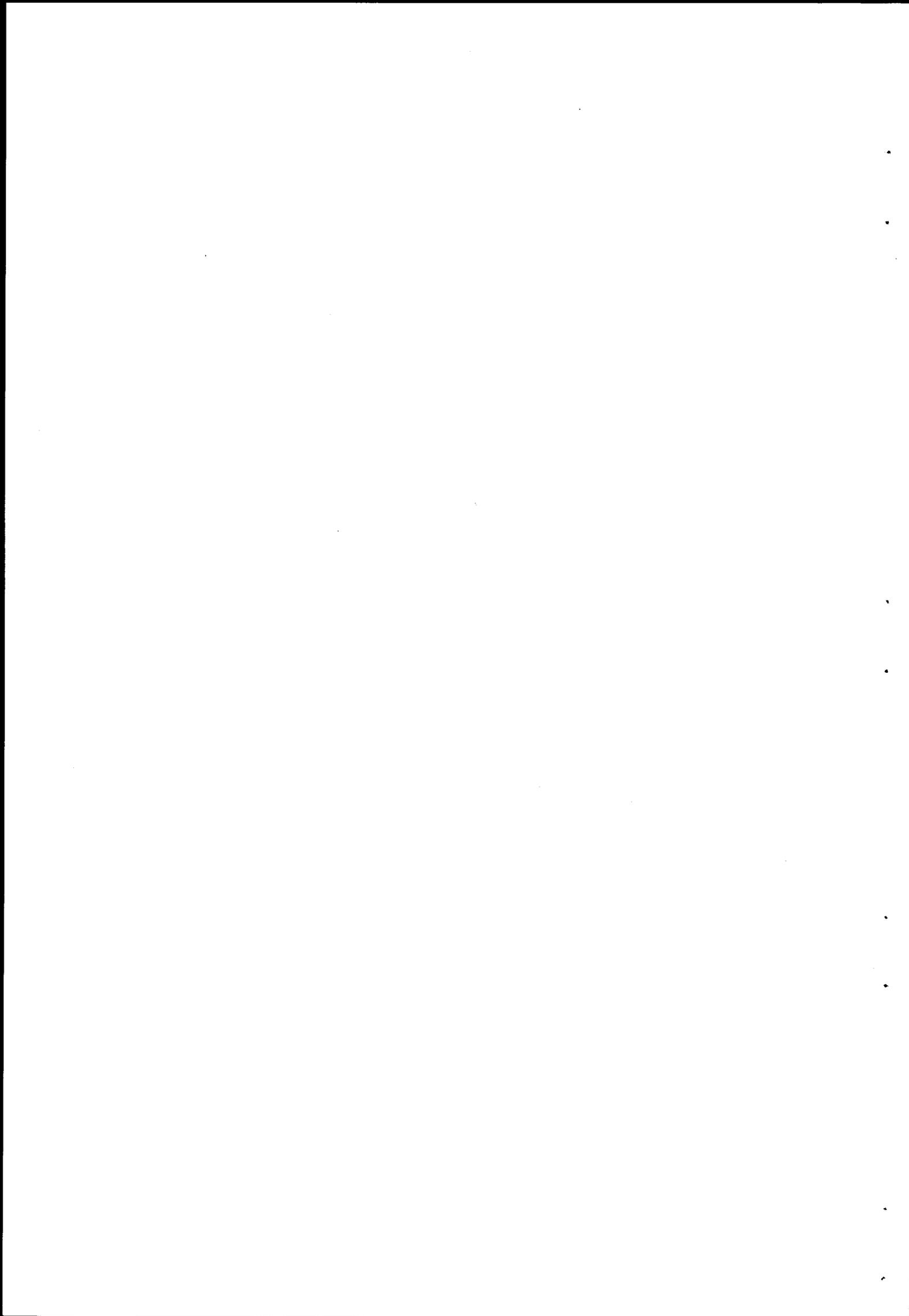
Ce dispositif d'expérimentation pour assurer le chauffage de gaines soumises à des essais thermiques a été mis au point pour les cas où il est impossible d'obtenir le chauffage direct de la gaine.

D'autres matériaux que le graphite ont été imaginés pour remplir cet office : métaux réfractaires, ou composés à base de siliciure de molybdène, mais aucun ne réunissait tous les avantages présentés par le graphite.

Un certain nombre d'améliorations peut vraisemblablement être apporté quant aux techniques d'utilisation, en particulier pour assurer un meilleur échange thermique entre la gaine et l'élément chauffant, par fretage par exemple.

Une utilisation plus longue de la méthode permettra de déterminer les limites dans lesquelles elle reste applicable. Nous pouvons toutefois signaler que nous avons pu dissiper, par ce moyen, un flux thermique moyen voisin de $700 \frac{\text{W}}{\text{cm}^2}$ rapporté à la surface extérieure du graphite sur des éléments chauffants de ϕ 0,1 cm et de longueur 50 cm.

Par ailleurs, dans le cas où l'on désire obtenir une distribution de flux thermique autre qu'uniforme, par exemple une répartition ayant une allure sinusoïdale, il est facilement concevable, avec la méthode précédente, de réaliser des éléments chauffants à section variable, c'est-à-dire à résistance électrique variable, qui permettraient d'obtenir la loi de distribution du flux désirée.



A N N E X E A 2

DETECTEURS DE BURN-OUT

Les systèmes de détection du burn-out permettent de couper la puissance fournie à la gaine essayée avant sa destruction lors de l'apparition de la "crise de caléfaction" (burn-out).

Parmi les moyens de détection, habituellement utilisés (variation de la résistance d'une portion de la gaine, canne à détection thermoélectrique,...) seules, la méthode basée sur la variation brutale de la température de paroi indiquée par un thermocouple, et la méthode optique nous sont apparues comme utilisables dans le cas du chauffage indirect interne.

1. - DETECTEUR A THERMOCOUPLE.

1.1. Schéma de principe (voir planche n° A2.1)

1.2. Description

1.2.1. Détection :

- thermocouples chromal-alumel, 2 AB At 05 - Al_2O_3 , sertis dans la partie terminale de la paroi de la gaine, admise comme étant la zone de plus grande température.
- la liaison, extérieure à la cellule, entre thermocouples et câbles de compensation, est assurée par des microfiches MF 5 (SODERN).
- chacun des thermocouples possède une soudure froide placée dans la glace fondante à 0°C.
- une commutation permet alternativement la mesure ou l'enregistrement de l'un des couples, en conservant le second en détection de burn-out.

1.2.2. Amplification et transmission du signal délivré par les thermocouples:

a) Appareillage

L'ensemble des fonctions est rassemblée dans un coffret représenté sur la photo de la planche A.2.2.

Sur la face avant sont placés les éléments suivants :

A.2.2

- deux prises d'entrée, repérées "AMPLI 1" et "AMPLI 2", attaquées par les câbles de liaison des thermocouples.
- deux prises de sortie, repérées "Relais 1" et "Relais 2".
- deux potentiomètres de réglage de zéro.
- deux potentiomètres de réglage de seuils et deux témoins lumineux correspondants.
- un galvanomètre gradué de 0 à 1.000°C.
- un commutateur rotatif à six positions : + 24 V, - 24 V , Ampli 1, Ampli 2, Seuil 1, Seuil 2.
- une borne de masse.
- une prise secteur avec témoin lumineux, interrupteur et fusibles.

A l'intérieur, (voir photo de la planche A2.3.), on distingue :

- un transformateur d'alimentation commutable de 110 à 240 V.
- un circuit imprimé "Redressement et filtrage" CFTH RF 203.
- deux circuits imprimés "Régulation" CFTH AR 203.
- un circuit imprimé "Bascules de sécurité" CFTH S 202
- un circuit imprimé "Commande des relais" CFTH CRL 201.
- deux circuits imprimés "Amplificateur" CFTH PDF 202.
- deux capacités qui assurent le filtrage des deux tensions d'alimentation.
- un filtre en π (une résistance, deux capacités) sur chaque voie, permet d'annuler le ronflement à 50 Hz.

Le schéma de principe de la planche A2.4 et le schéma A2.5 indiquent la liaison de ces différents éléments et circuits.

b) Fonction des différents circuits

- Amplificateur : la f.é.m. délivrée par le thermocouple attaque un étage différentiel à entrée indépendante de la masse.

Le blindage du câble de liaison, ramené à la masse électronique de l'amplificateur est isolé de la masse du châssis.

Le gain de l'amplificateur est 250.

La tension de sortie de l'amplificateur peut être mesurée par un galvanomètre gradué directement en degrés (0 à 1.000°C).

- Bascule de sécurité : la bascule commande le dispositif de coupure par l'intermédiaire d'un relai. Une tension réglable, dite "tension de seuil", sert de référence à la commande de la bascule. Au-dessous de cette tension le relai est en position repos. Quand la valeur de la tension de détecteur atteint ce seuil, le relai se ferme et commande la disjonction.

L'amplificateur délivrant une tension de sortie comprise entre 0 et - 10 V., la tension du seuil sera réglable entre 0 et + 10 V.

La valeur nécessaire au basculement est de + 0,1 V. continu. Par exemple, si on règle le seuil à une valeur correspondant à 500°C, le déclenchement aura lieu pour une température de thermocouple comprise entre 490°C et 500°C (car 10°C \approx 0,1 V.)

- Relai : la commande du relai est botenu par l'intermédiaire d'un transistor qui a pour but de fournir le courant nécessaire à l'excitation de la bobine.

Un voyant lumineux indique la fermeture du contact du relai.

Compte tenu des caractéristiques de coupure de la bobine du disjoncteur, il a été nécessaire d'utiliser en parallèle les cinq contacts d'un relai EP 5 (M.T.I.).

Afin d'éviter des battements intempestifs à l'approche du seuil, dus à la superposition d'une tension alternative à 50 Hz, il a été prévu un filtre en π , entre l'amplificateur et la bascule correspondante.

Les deux voies de l'appareil sont équipées identiquement.

1.2.3. Coupure :

Le disjoncteur à coupure rapide coupe l'alimentation triphasée 380 V des redresseurs. La commande du déclenchement est du type à émission de courant. Le temps de réponse du disjoncteur est de 25 ms.

Des renseignements complémentaires, le schéma électrique et des photographies de cet appareil sont donnés au paragraphe 4.1 du présent rapport.

1.3. Fonctionnement

Les essais effectués avec cet ensemble de détection ont permis de montrer que la tenue des contacts des relais EP 5 était bonne malgré les caractéristiques électriques élevées du circuit de déclenchement du disjoncteur à coupure rapide (tension continue 240 V. - 12 A.)

Des mesures du temps de réponse de l'ensemble ont été effectuées avec un enregistreur oscillographique A.C.B. type AO 300. La copie de l'un de ces enregistrements est donnée dans la planche A2.6. Le temps de réponse moyen est de l'ordre de 45 ms.

Cet ensemble, dans le cadre de nos expérimentations, s'est malheureusement révélé inadapté pour deux raisons :

- a) l'endroit de l'apparition du phénomène de burn-out sur la gaine étant indéterminé, il est évident que la position des thermocouples de détection ne peut être qu'arbitraire.

Au cours d'essais sur gaines cylindriques, des destructions ont été obtenues à des endroits très voisins de l'emplacement des thermocouples de détection avant que ceux-ci ne soient sensibles à la variation de la température. Les seuils de déclenchement du détecteur étaient réglés dans ce cas à une valeur de température qui n'excédait la température de saturation que de 70°C. La photographie de la planche A2.7 représente un burn-out obtenu dans ces conditions.

- b) D'autre part, si accidentellement le thermocouple de détection se trouvait au potentiel de la gaine et que celle-ci, par suite d'un défaut d'isolement (voir paragraphe 3.4 du présent rapport), transmette au thermocouple des tensions parasites provoquant des déclenchements intempestifs, le système de détection devenait inutilisable.

Il a donc fallu étudier un autre dispositif de détection qui permette de remédier à ces deux défauts.

2. - DETECTEUR A CELLULE PHOTORESISTANTE.

2.1. Schéma de principe (voir planche n° A2.8)

2.2. Description

2.2.1. Détection :

- photorésistance SEGOR, type 1422, au séléniure de cadmium, activateur H 21, résistance à l'obscurité : 100 MOhms enfichable dans un support.
- la température maximale de fonctionnement des photorésistances étant de 60°C, il a été nécessaire de les placer à l'extérieur de la cellule d'essais dans un compartiment optique refroidi par circulation d'eau. La planche A2.9 montre une coupe de ce dispositif et la photographie de la planche A2.10 donne une vue d'une photorésistance sur son support et du compartiment optique.

Les deux lentilles plan-convexes permettent de concentrer sur la surface de la photorésistance, la lumière issue de la section d'essais.

Le dessin de la planche n° 3 du présent rapport montre la disposition de cet ensemble sur la cellule d'essais.

2.2.2. Amplification et transmission du signal délivré par la photorésistance :

Le matériel décrit au paragraphe 1.2.2. a été conservé. Seule, une adaptation d'impédance d'entrée des amplificateurs a été nécessaire.

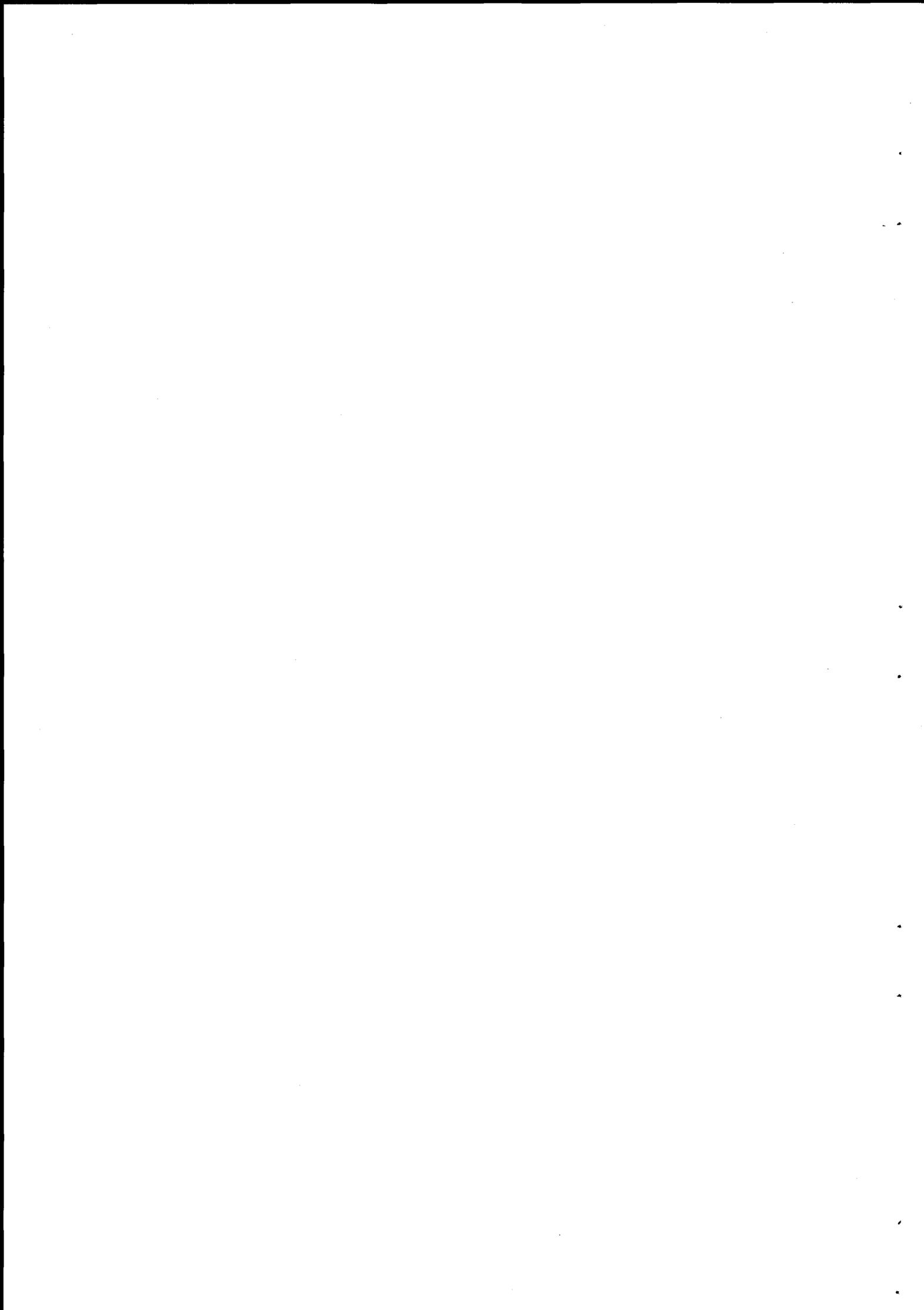
A cet effet, un adaptateur extérieur pour les deux voies, a été réalisé.

Une vue de cet appareil est donnée planche A2.12 et son schéma de principe à la planche A2.11.

2.2.3. Fonctionnement :

Les essais effectués avec ce dispositif, bien que peu nombreux, ont permis de vérifier la viabilité du principe. Plusieurs valeurs de flux de burn-out ont pu être mesurées sans destruction de la gaine.

Ce dispositif qui ne possède aucun des inconvénients signalés pour le détecteur à thermocouples, nous paraît être le seul utilisable dans le cadre de nos expérimentations.



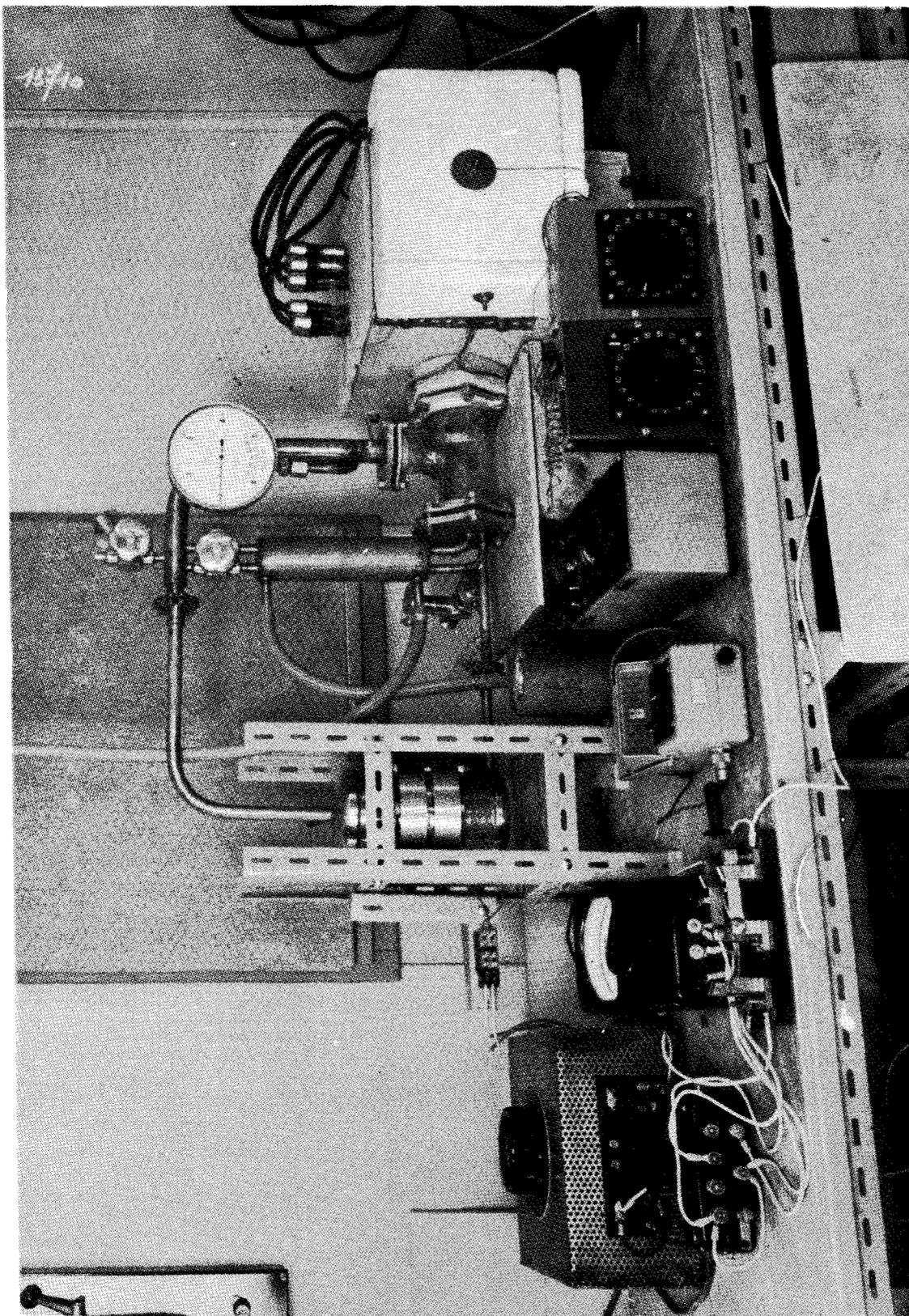


Fig. 1

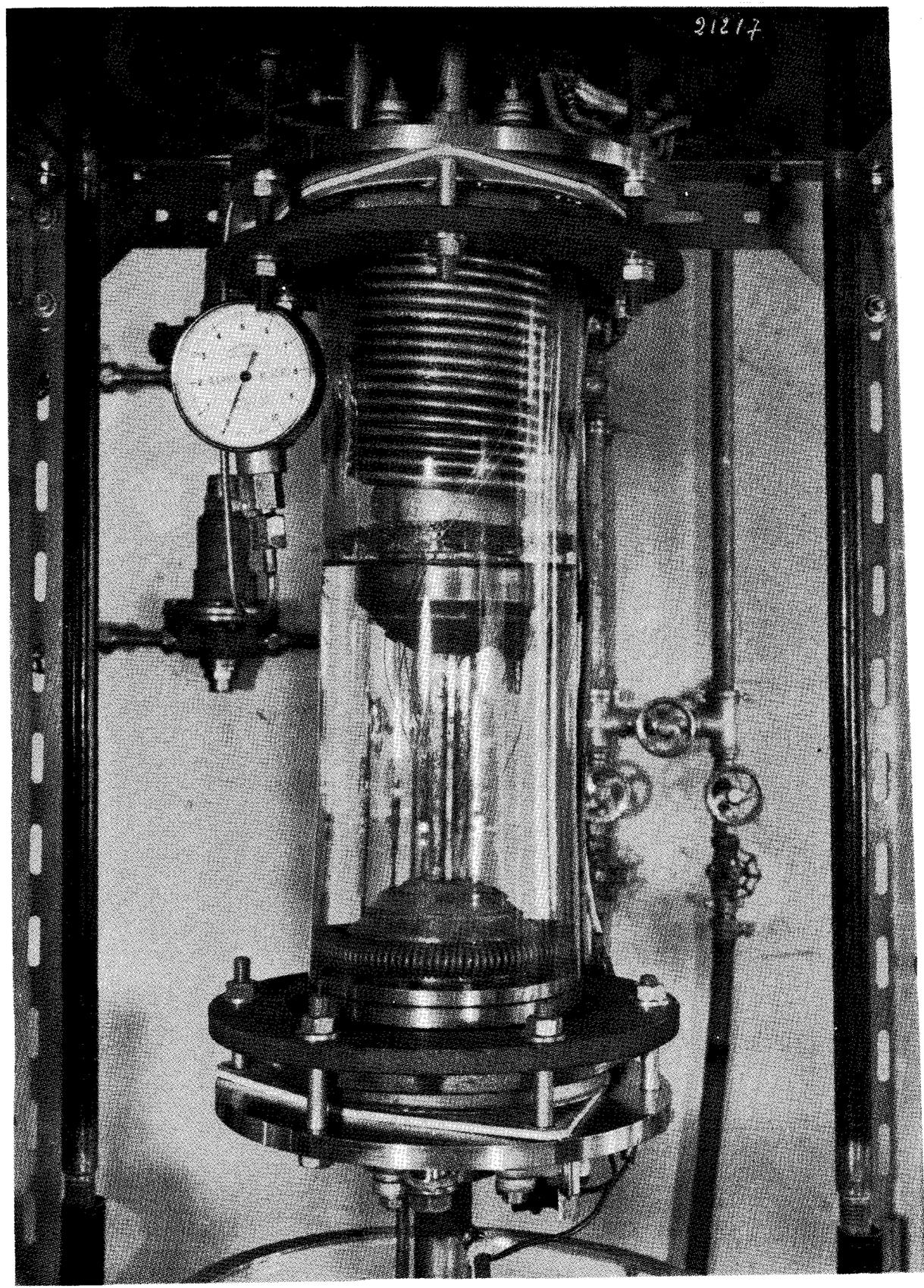


Fig. 2

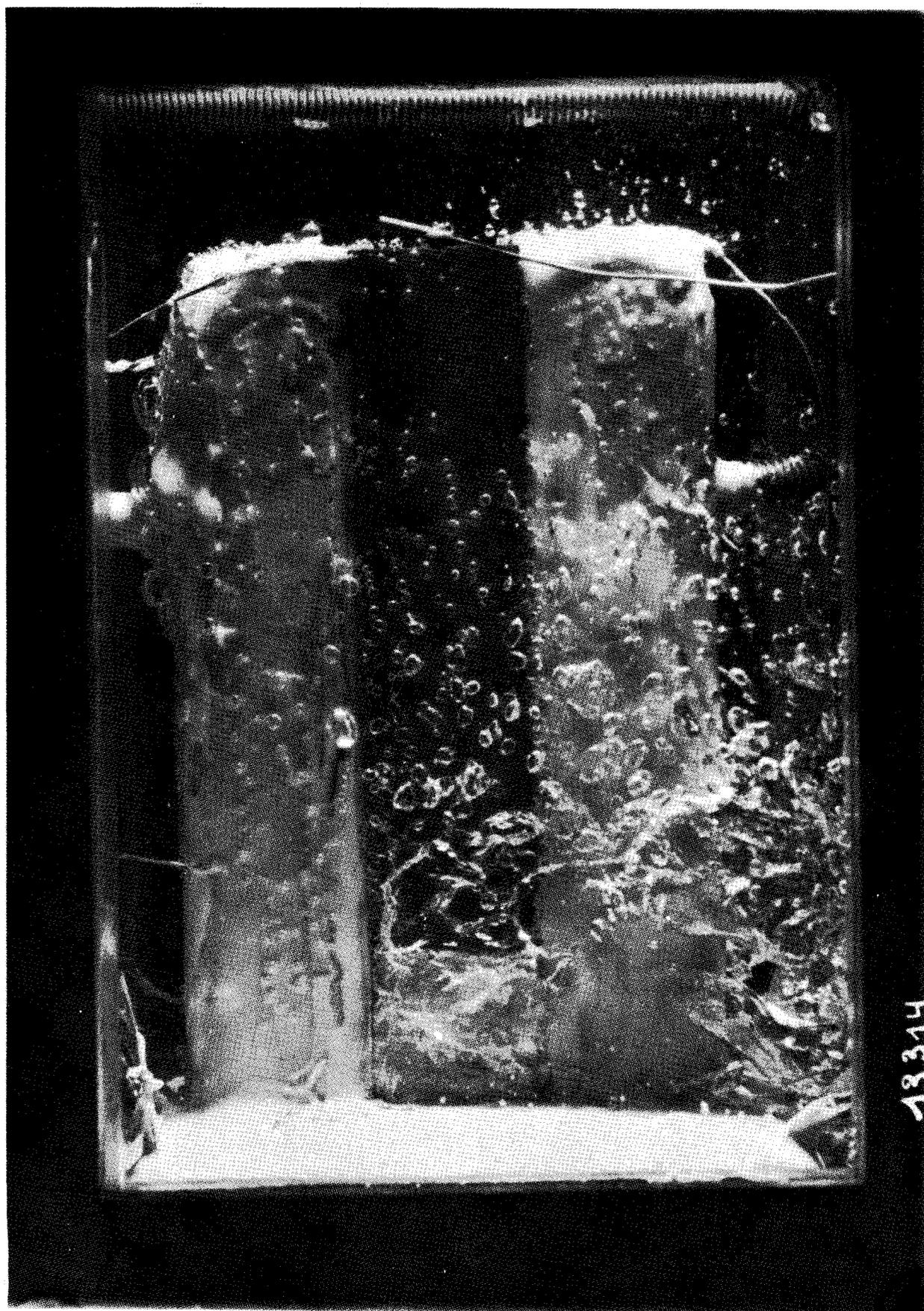
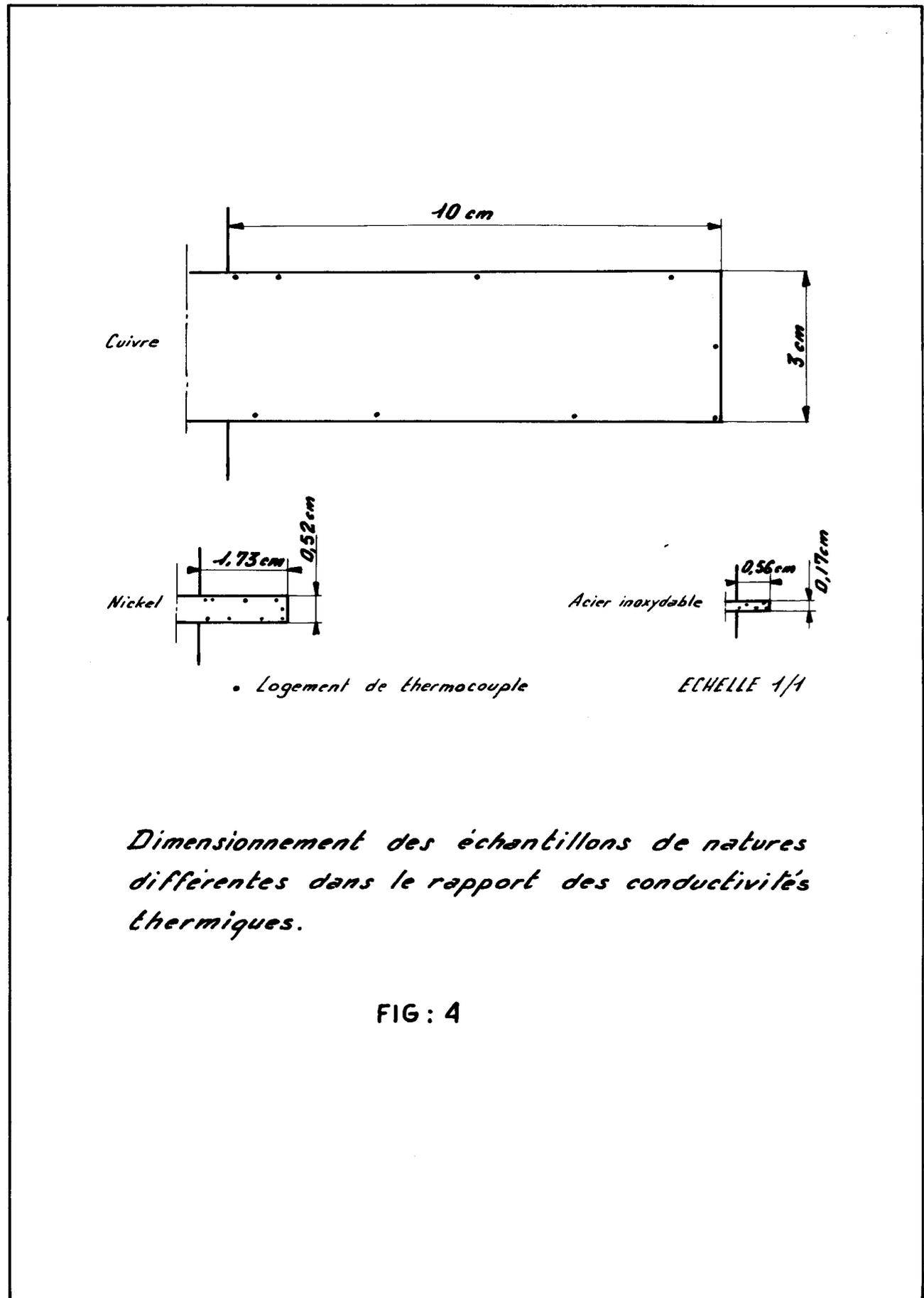


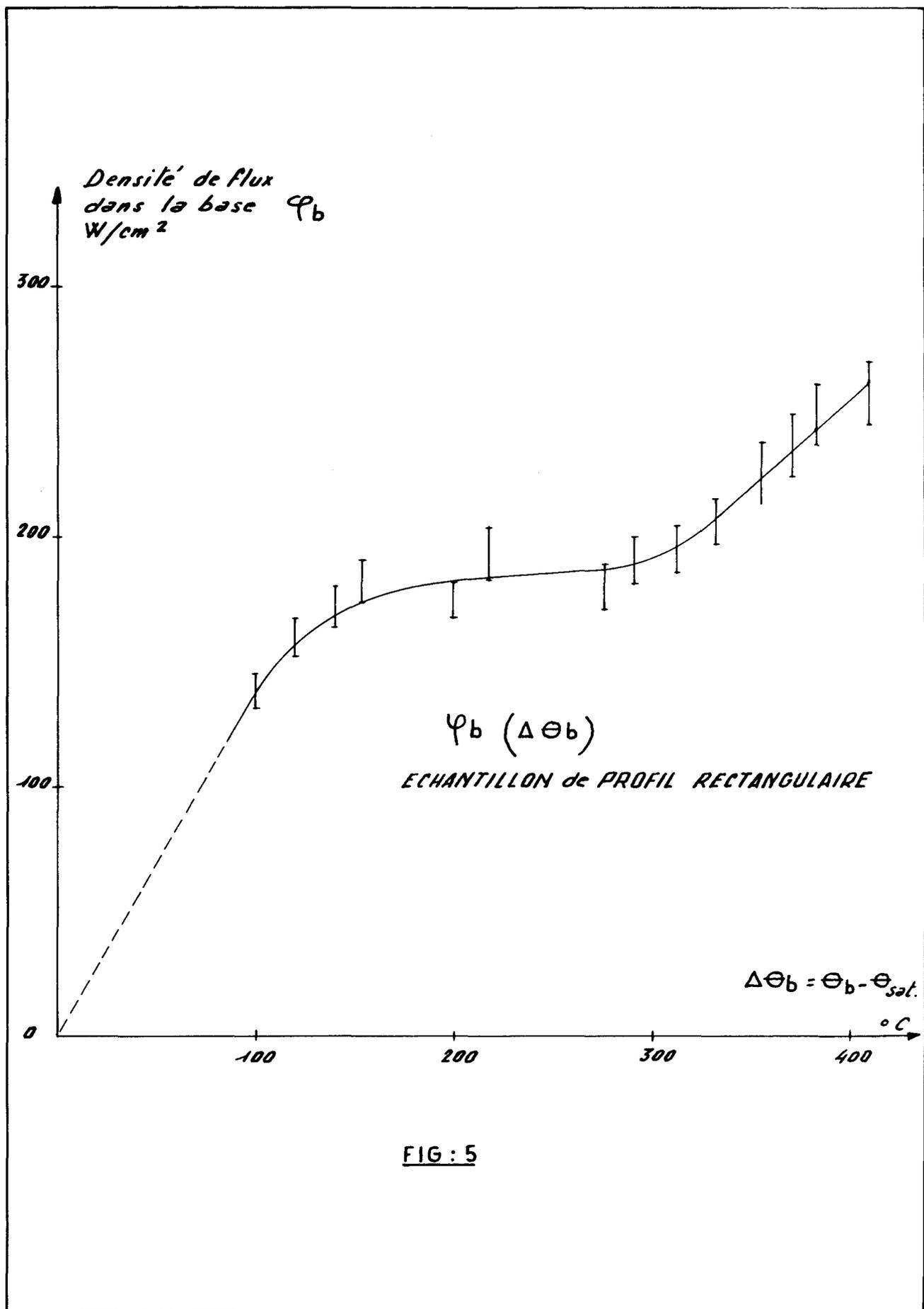
Fig. 3

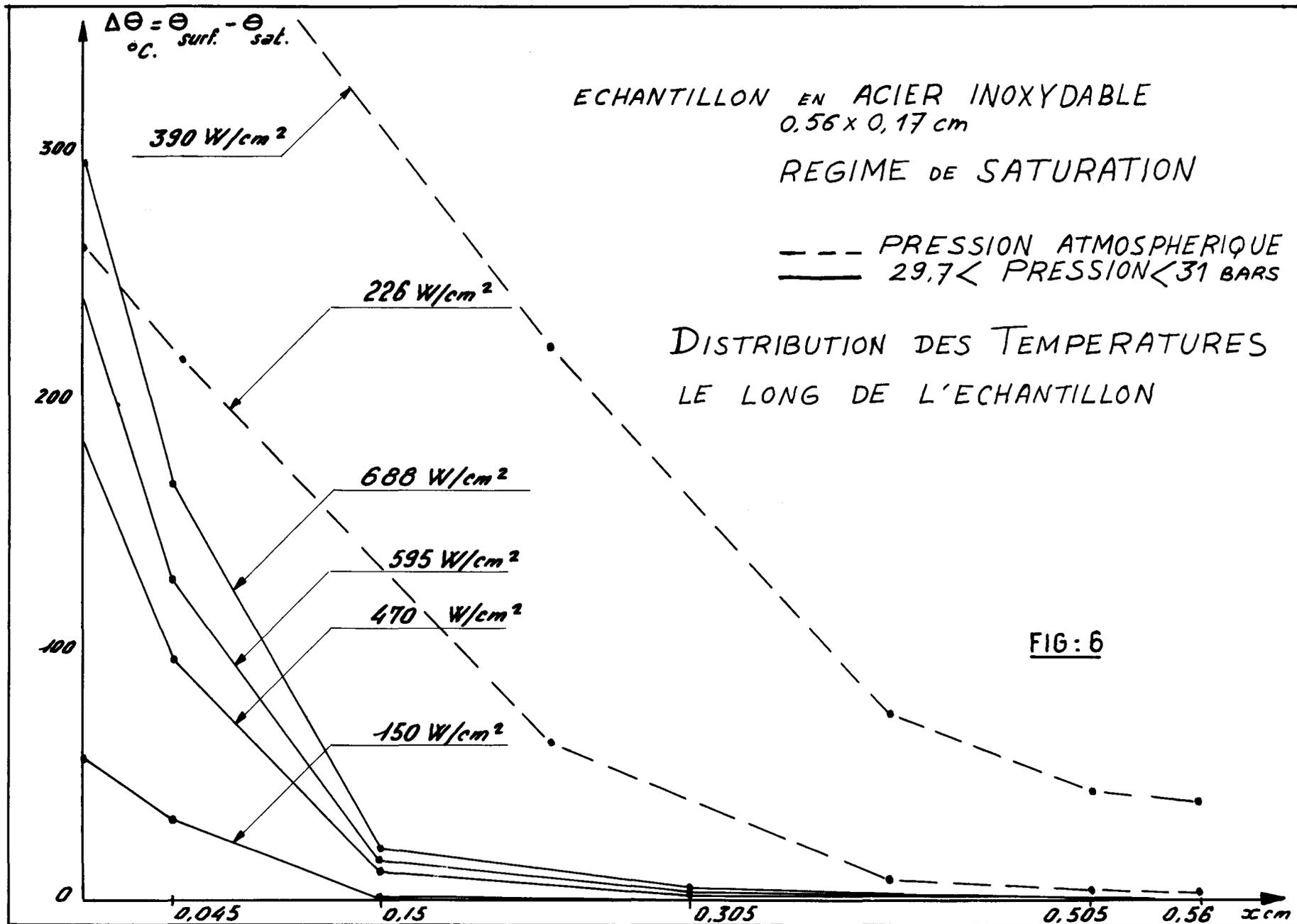
18314



Dimensionnement des échantillons de natures différentes dans le rapport des conductivités thermiques.

FIG : 4





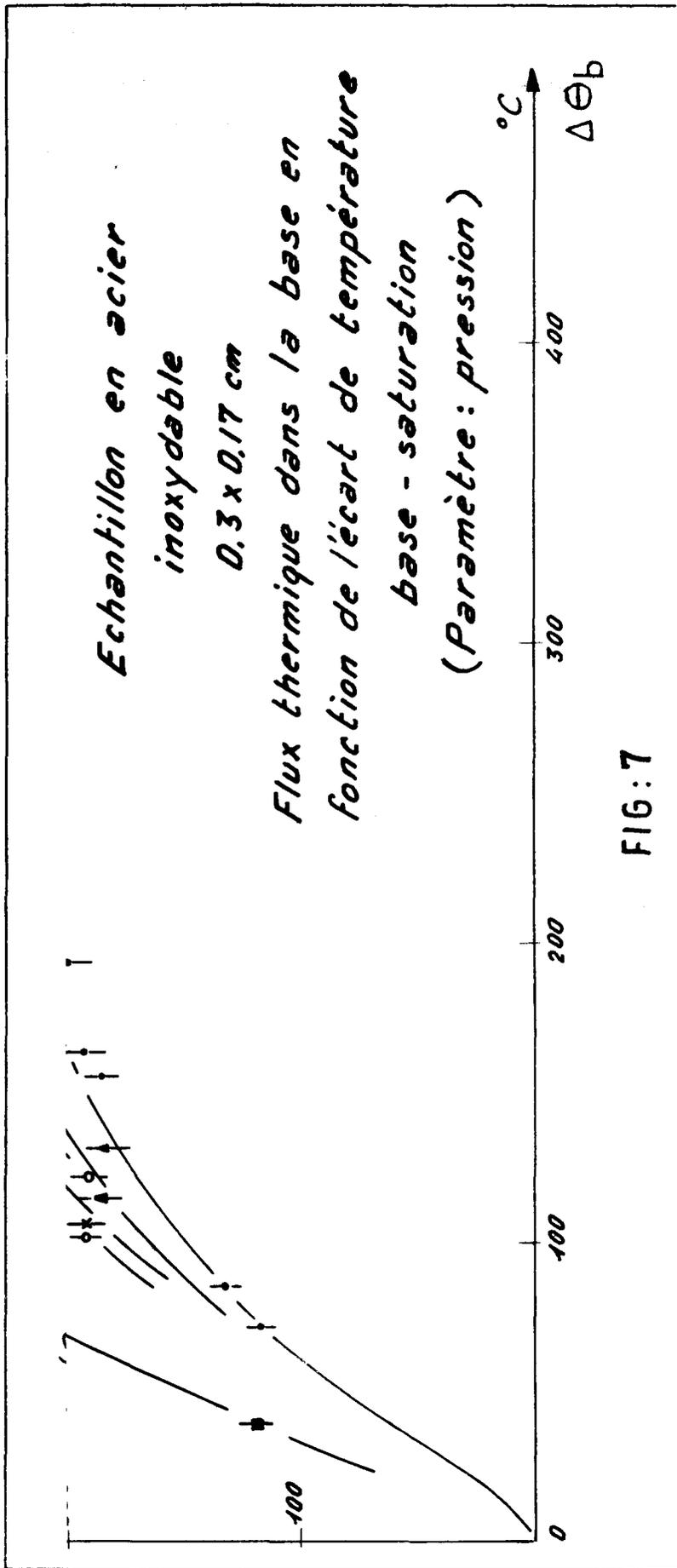
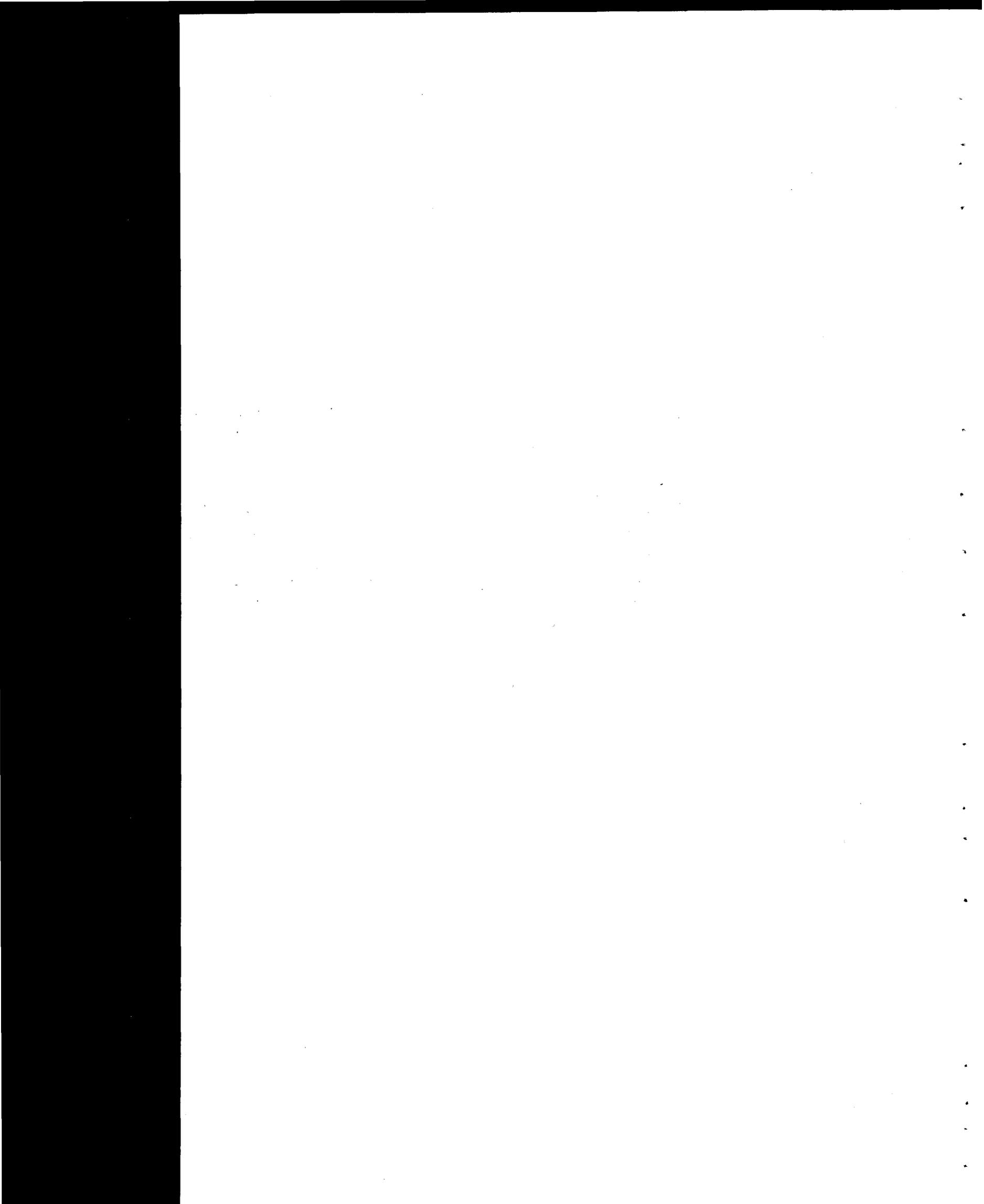
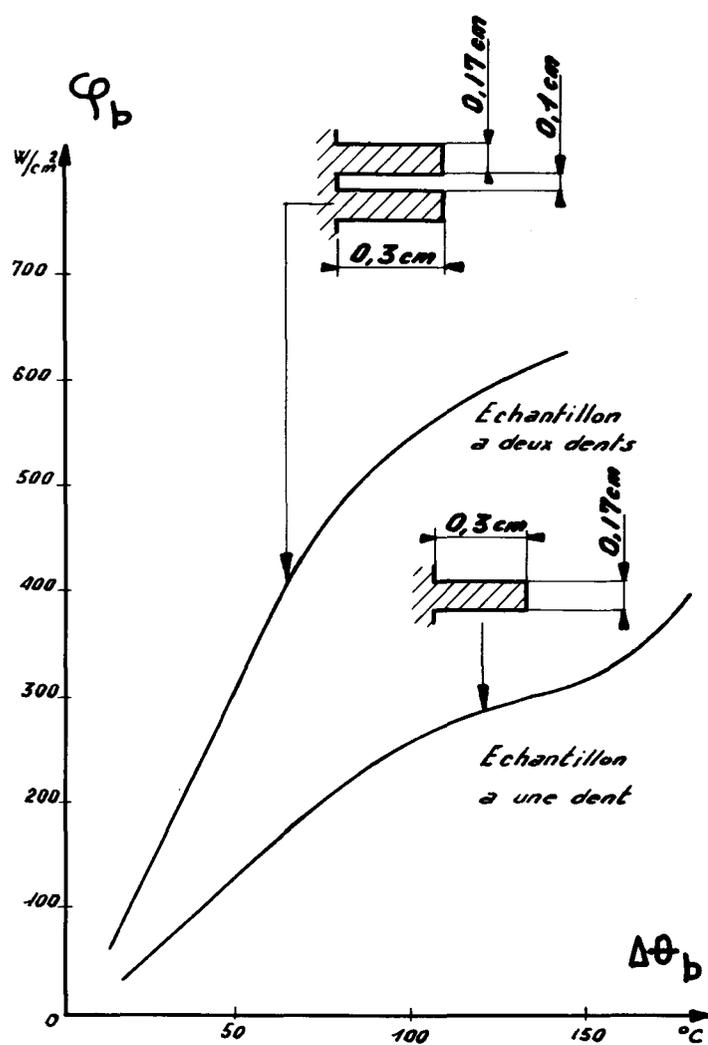


FIG: 7



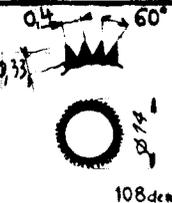
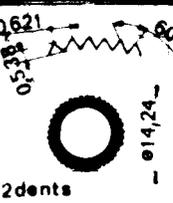
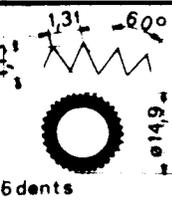
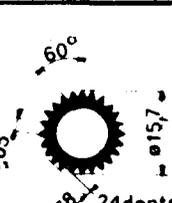
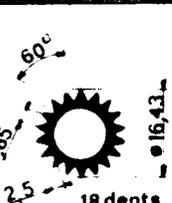


AMELIORATION DUE AU CANAL INTERDENTS
Echantillon en acier inoxydable.

FIG: 8

FIG. 9

TABLEAU COMPARATIF DES SECTIONS

A	GAINES Cotes en mm	 1 8315 204	 2 8.317.121	 3 8315 207 8316 666	 4 8 316 626	 5 8 316 651	 6 8316 646
B	SECTION MOYENNE en cm ²	0,66 ₇₃	0,66 ₇	0,68 ₃₇	0,68 ₄₁	0,68 ₈₅	0,64 ₈₇
C	PERIMETRE EXT. de la gaine en cm	4,27 ₂	8,33 ₇	8,95	9,36 ₂	9,86	10,32
D	RAPPORT : r r = surface d'échange surface intérieur gaine	1,36	2,65 ₄	2,85	2,98	3,14	3,28 ₆
E	RAPPORT : R R = surf. d'échange réelle surf. d'éch. réelle gaine	1	1,95 ₁	2,09	2,21	2,30 ₉	2,41 ₆
F	DIAMETRE EXTERIEUR DE LA GAINES ISOTHERME DE SECTION EQUIVALENTE	1,36 cm	1,36 cm	1,36 cm	1,37 cm	1,37 cm	1,35 cm
G	SECTION de PASSAGE (canal de Ø int. 3,6cm) en cm ²	8,72 ₁₃	8,72	8,70 ₄₉	8,70 ₄₅	8,70	8,74
H	PERIMETRE MOUILLE (canal de Ø int. 3,6cm) en cm	15,58	19,64	20,25 ₄	20,66 ₆	21,16 ₄	21,62 ₄
I	DIAMETRE HYDRAULY (en cm) $D_h = 4 \frac{S}{P}$	2,23 ₉₁	1,76	1,71 ₉	1,68 ₄	1,64 ₄	1,61 ₆
J	SECT. DE PASSAGE (Canal de Ø int. 2,45cm) en cm ²	3,25 ₉₇	3,26	3,24 ₃₃	3,24 ₂₉	3,23 ₈₅	3,27 ₈₃
K	PERIMETRE MOUILLE (Canal de Ø int. 2,45cm) en cm	11,97	16,03 ₅	16,64 ₈	17,06	17,55 ₈	18,01 ₈
L	DIAMETRE HYDRAU. Canal de Ø int. 2,45cm en cm	1,08 ₉₅	0,814	0,78	0,76 ₁₂	0,738	0,728

Plan N° 860527 A

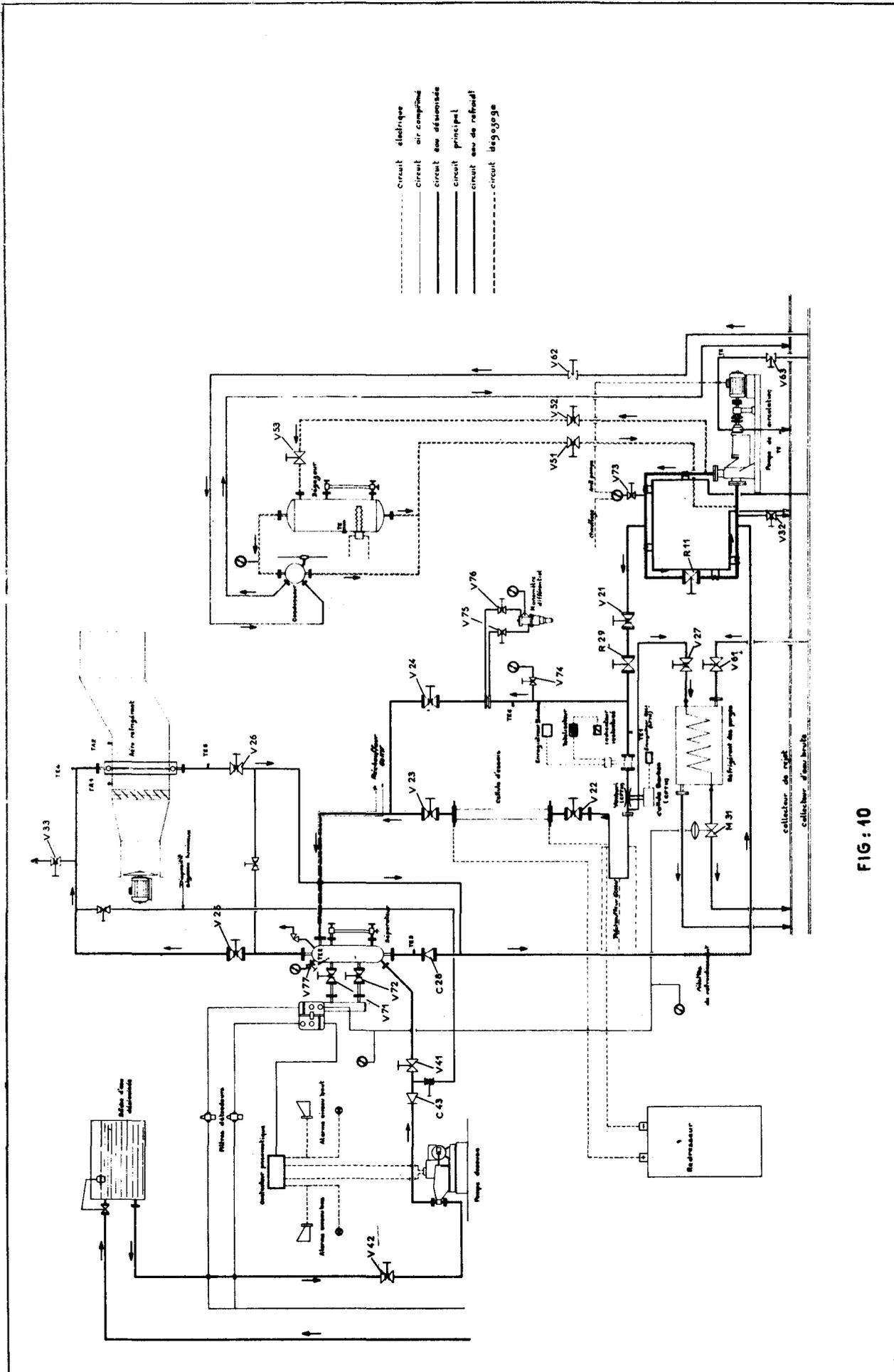


FIG: 10

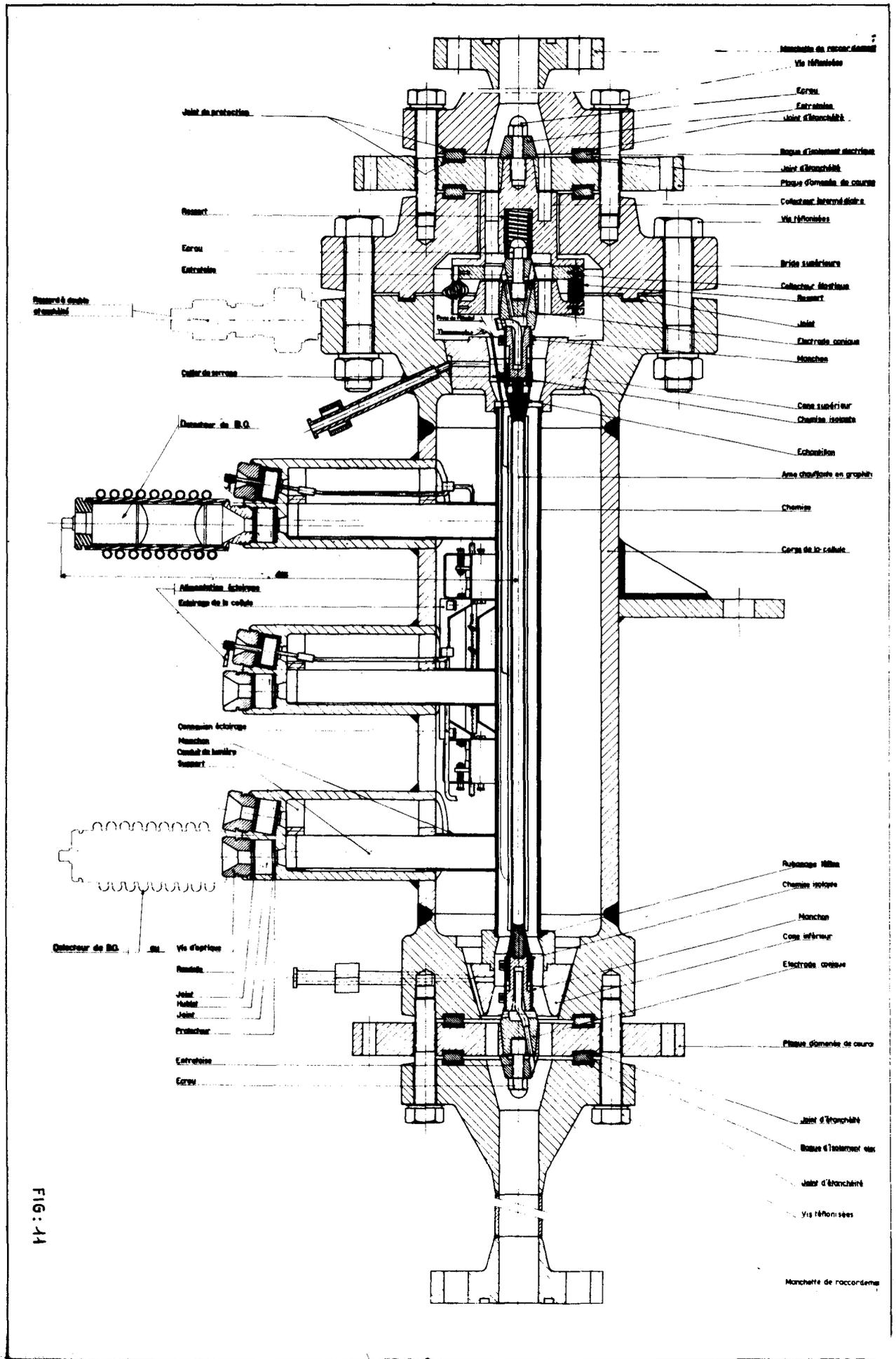


FIG. 11

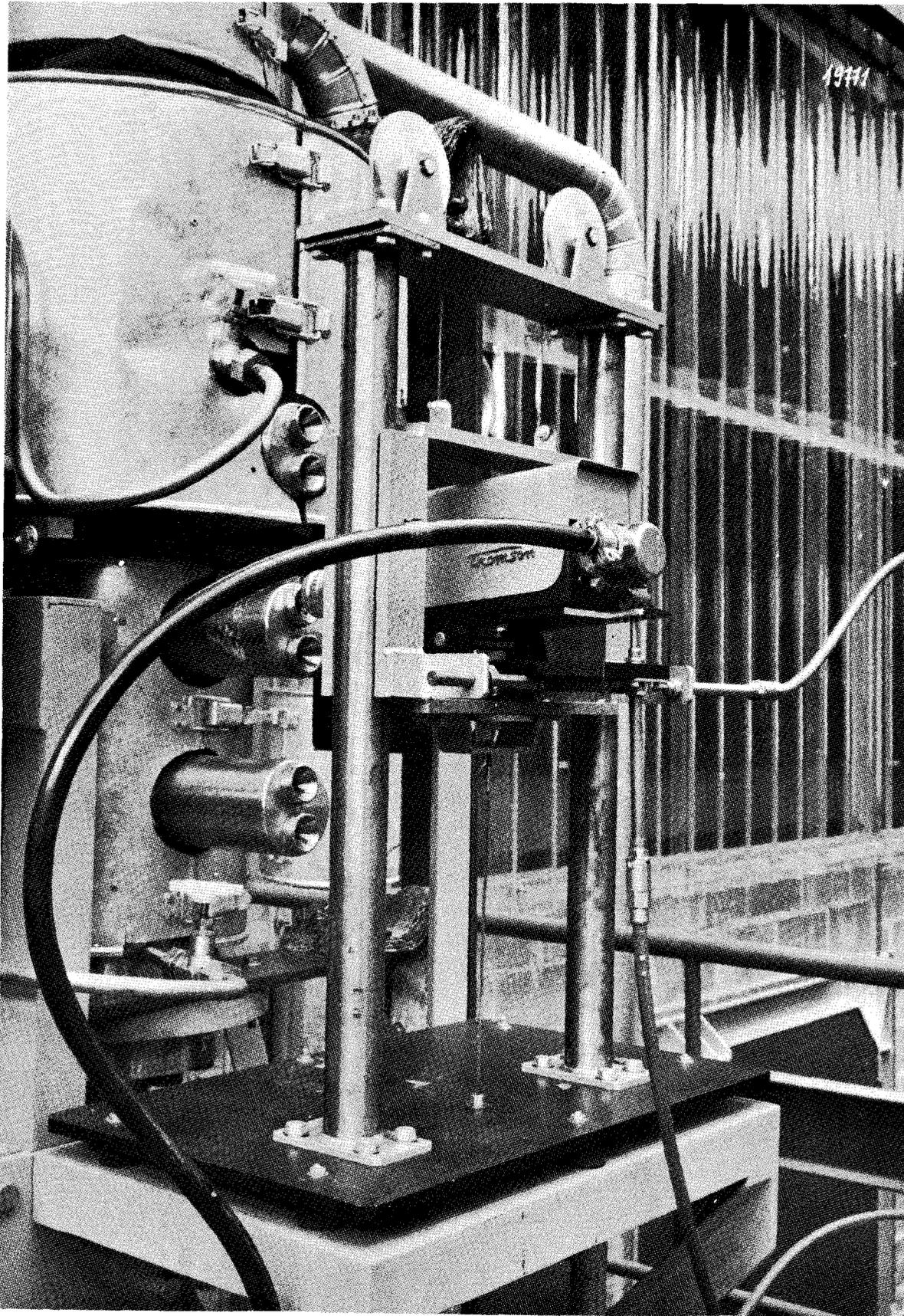
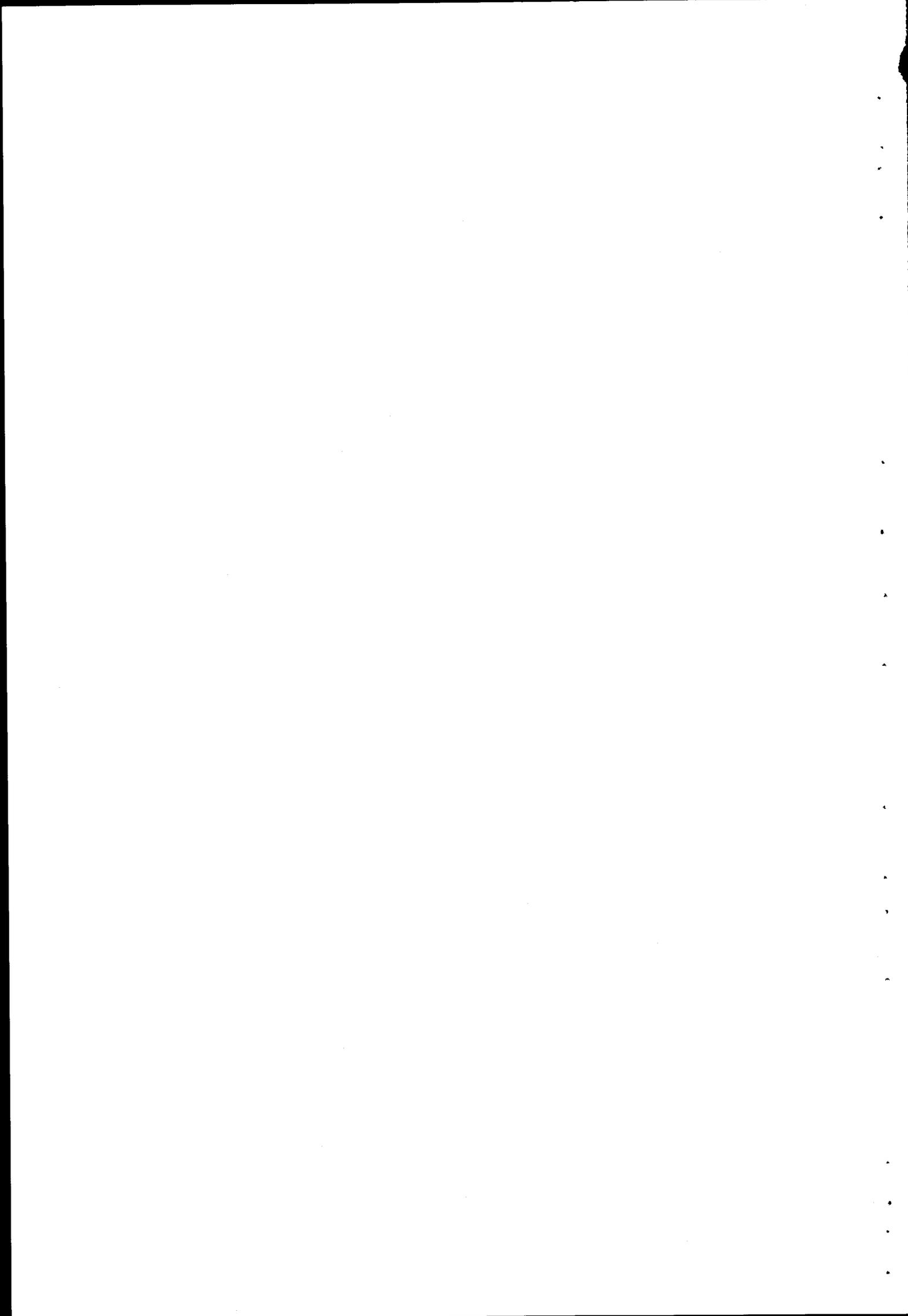
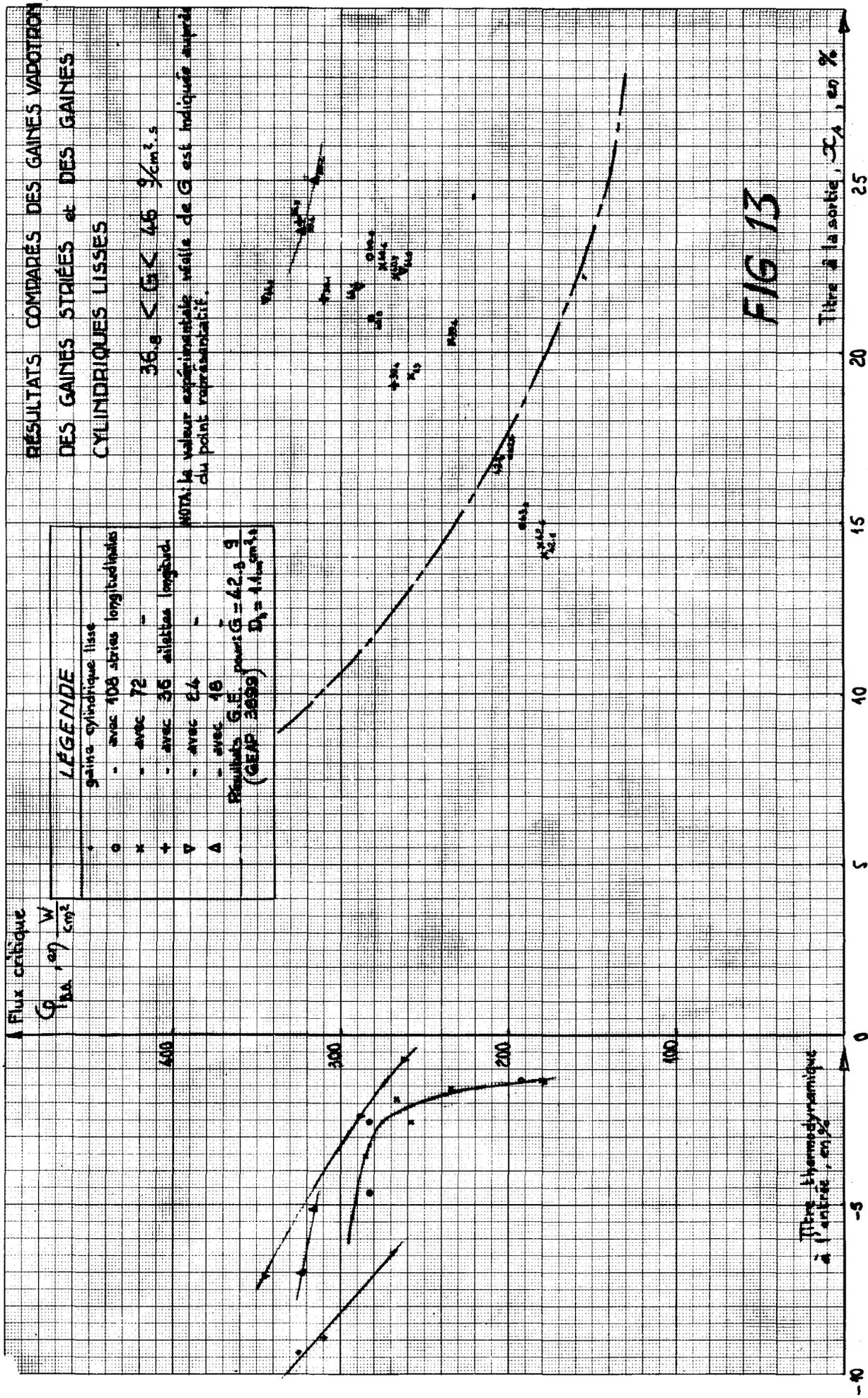


Fig. 12





Titre à la sortie, \mathcal{J}_A , en %

Titre thermodynamique
à l'entrée, en J

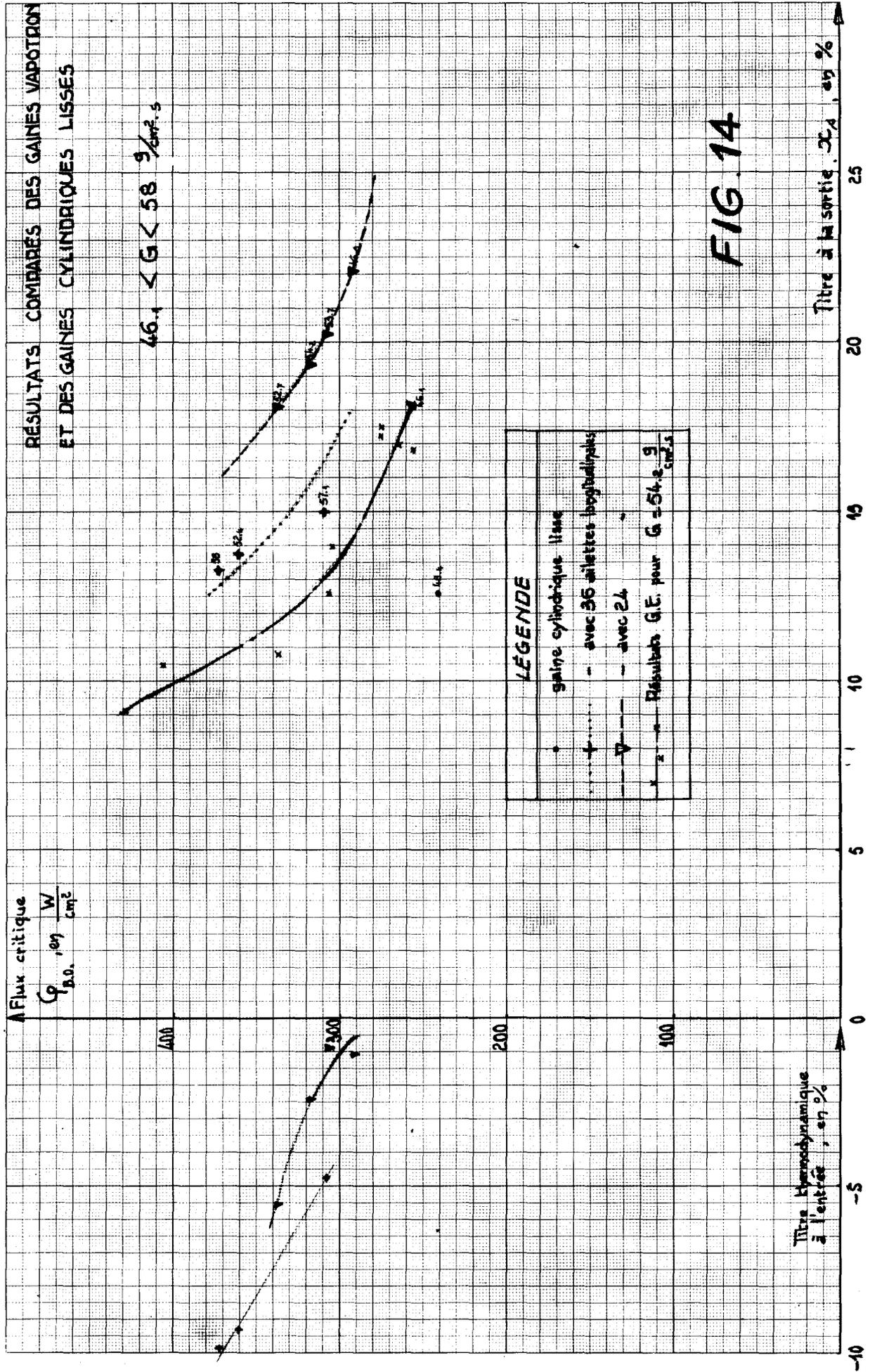


FIG. 14

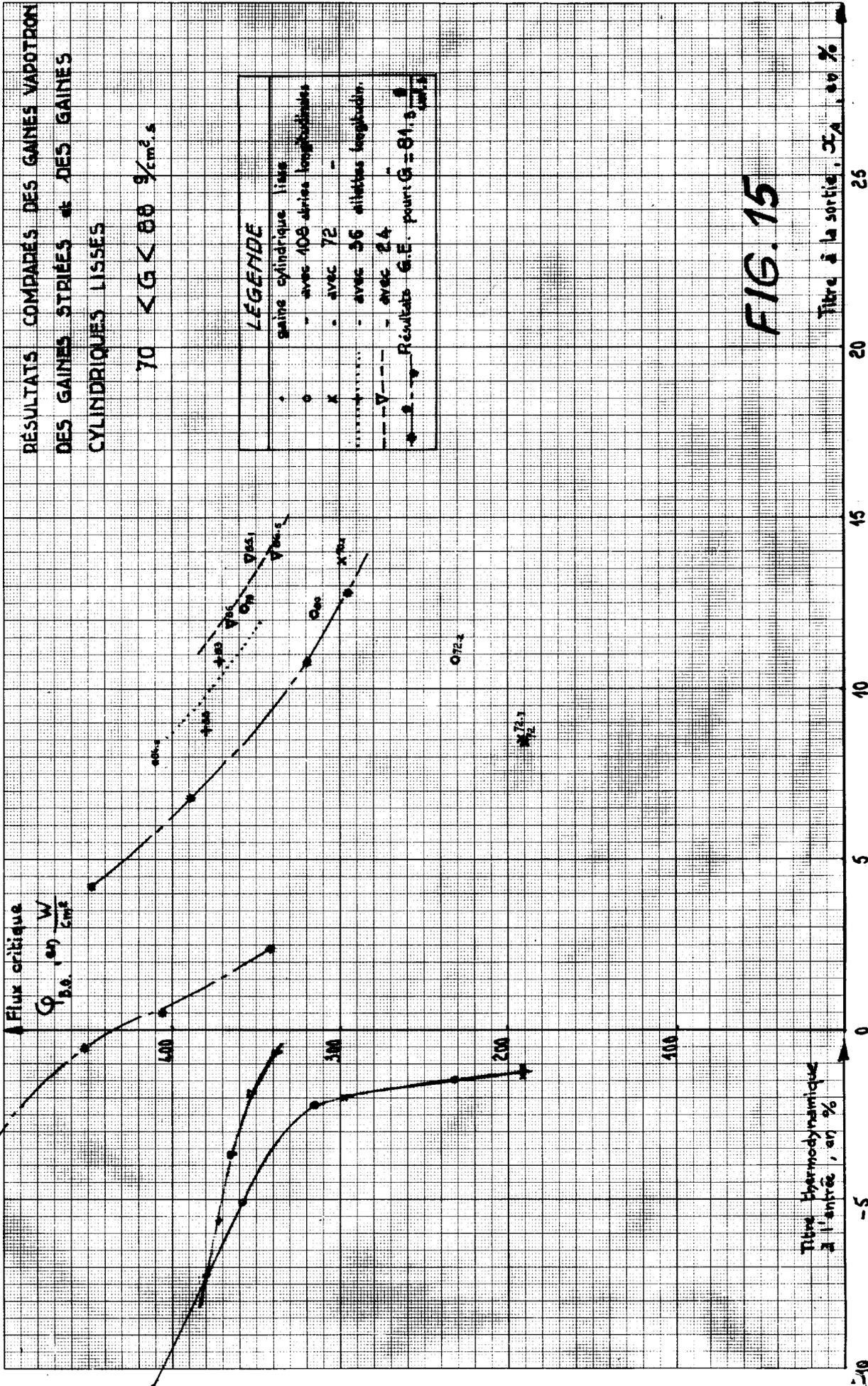


FIG. 15

ANNEXE A.1

Fig. 16

TABLEAU RECAPITULATIF DES VALEURS DE BURN-OUT

Gains	No d'essai	Pression	Vitesse massique	Puissance	Densité de flux thermique	Diamètre du canal d'écou- lement	Section de passage	Titre char- bonnifique à l'entrée	Titre en masse à la sortie	Observations	
		p	G	P _g	ρ'	d	s	x _e	x _s		
		$\frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2} \text{ abs}$	$\frac{\text{g}}{\text{cm}^3 \cdot \text{s}}$	W	$\frac{\text{W}}{\text{cm}^2}$	cm	cm ²	%	%		
Cyl. lisse	C. 1	64.5	14.43	49 813	278	3.6	8.72	- 1,84	24.5		
	C. 2	69	9.47	43 000	295			- 3,78	30		
	C. 3	67.5	65.9	55 550	386			- 1,34	5		
	C. 4	64.5	15.8	54 698	305			- 0,68	25.8		
	C. 5	69.3	21.75	53 592	299			- 0,24	18.7		
	C. 6	69.5	29.65	55 746	312			- 0,14	14.3		
	C.11	65	84.8	78 600	411	2.45	3.3	- 10,54	7.9		
	C.12	69.5	217.5	78 600	411			- 5,14	2.1		
	C.13	65	158.2	74 612	385			- 5,12	4.24		
	C.14	66.5	44.15	44 180	228			- 2,05	17.85		
	C.15	72.7	42.4	38 715	200			- 1,76	16.95		
	C.16	65.5	46.1	49 632	256.5			- 3,34	18.15		
	C.17	63	48.4	46 508	240.8			- 6,35	12.55		
	C.18	67	42.2	39 800	204.5			- 1,81	16.95		
	108 Stries	108.5	68.5	40.6	51 870	283			- 2,57	22.8	
		108.6	69	40.8	51 750	282.3			- 4,62	21	
		108.7	67	80	57 800	315.5			- 2,2	12.2	
		108.8	68.5	79	65 625	358			- 5,09	12.35	
72 Stries	72.1	69.5	39.4	42 940	234.3	2.45	3.3	- 1,57	20.3		
	72.2	70	40.7	48 800	266.5			- 1,89	22.2		
	72.3	69.5	40.6	52 388	285.8			- 3,55	22.5		
	72.4	69.3	70.1	54 600	298			- 2	13.8		
36 Ailettes	36.1	67.7	20.7	71 250	387	3.6	8.705	- 1,34	24.9		
	36.8	64	37.8	76 492	416			- 1,57	14.2		
	36.11	67.5	39.4	49 163	268.5	2.45	3.27	- 6,38	19.05		
	36.12	67.5	38.1	56 857	310			- 8,9	21.55		
	36.13	68	36.8	59 500	325			- 9,33	23.8		
	36.14	67.5	57.1	56 430	308			- 4,74	15		
	36.15	65.5	52.4	65 975	360			- 9,3	13.75		
	36.16	61.6	58	68 080	372			- 9,85	13.3		
	36.17	65.5	83	68 080	372			- 5,62	10.85		
	36.18	65.5	88	69 600	380			- 7,25	8.8		
24 Ailettes	24.5	66	19.74	66 600	363.5			- 5	20.9		
	24.11	67.5	41.88	48 068	262.2	2.45	3.27	- 0,71	22.4		
	24.12	69	46.83	53 475	291.8			- 1,08	22.1		
	24.13	69	44.93	63 263	345			- 7,1	21.55		
	24.14	69.5	54.21	58 017	317			- 2,43	19.3		
	24.15	72.65	53.7	56 018	306.5			- 0,9	20.5		
	24.16	67	52.74	61 610	336.5			- 5,51	18.15		
	24.17	65.5	86	66 875	365			- 3,67	11.9		
	24.18	70	85.09	64 837	353.5			- 1,79	13.9		
	24.19	66.45	86.53	61 965	338			- 6,81	13.9		
	24.20	70.5	126.7	60 000	327.5			- 0,69	8.9		
	24.21	66.45	44.53	52 900	288.5			- 2,37	21.9		
18 Ailettes	18.3	70.9	34.55	79 440	442			- 1,68	16.3		
	18.4	70.5	52.9	84 870	472			- 2,11	10.45		
	18.11	65	38.2	57 800	315.3	2.45	3.282	- 5,12	25		
	18.12	63	38.4	58 995	322.4			- 6,98	23.5		

GAIN DES GAINES CORRUGUEES

$G = 40 \text{ g/cm}^2 \cdot \text{s}$

GAINÉ	G g/cm ² · s	x_s %	ψ B.O. cylind. w/cm ²	ψ B.O. gaine corruguée w/cm ²	η GAIN Adimensionnel
Cylind. lisse	42	20	177	-	-
108 stries	41	20	7	295	1,68
72 stries	41	20	-id-	295	-id-
36 ailettes	37	20		360	2,03
18 ailettes	38	20		360	
Cylind. lisse	42	25	140	-	-
108 stries	41	25		255	1,82
72 stries	41	25		-id-	-id-
36 ailettes	37	25		315	2,25
18 ailettes	33	25		-id-	-id-

Fig. 17.a

GAIN DES GAINES CORRUGUEES

$$G = 55 \text{ g/cm}^2 \cdot \text{s}$$

GAINÉ	G g/cm ² · s	x _s %	φ B.O. cylind.lisse w/cm ²	φ B.O. gaine corruguée w/cm ²	η GAIN Adimension
cylind.lisse	54	15	280		
36 ailettes	55	15		330	1,18
24 ailettes	54	15		390	1,40
cylind.lisse	54	20	230		
24 ailettes	54	20		310	1,35
cylind.lisse	54	25	190		
24 ailettes	54			280	1,48

Fig. 17.b

GAIN DES GAINES CORRUGUEES

$$G = 80 \text{ g/cm}^2 \cdot \text{s}$$

GAINÉ	G	x_s	φ B.O. cylind.lisse	φ B.O. gaine corruguée	η GAIN
cylind.lisse	81	10	330		
108 stries	79	10		390	1,18
24 ailettes	86	10		400	1,21
cylind.lisse	81	15	270		
108 stries	79	15		320	1,18
24 ailettes	86	15		330	1,22

Fig. 17.c

GAIN DES GAINES CORRUGUEES

$$G = 110 \text{ g/cm}^2 \cdot \text{s}$$

GAINÉ	G g/cm ² .s	x _s %	ψ B.O. cylind.lisse w/cm ²	ψ B.O. gaine corruguée w/cm ²	η GAIN
cylind.lisse	110	9	220		
24 ailettes	127			330	1,50

Fig. 17.d

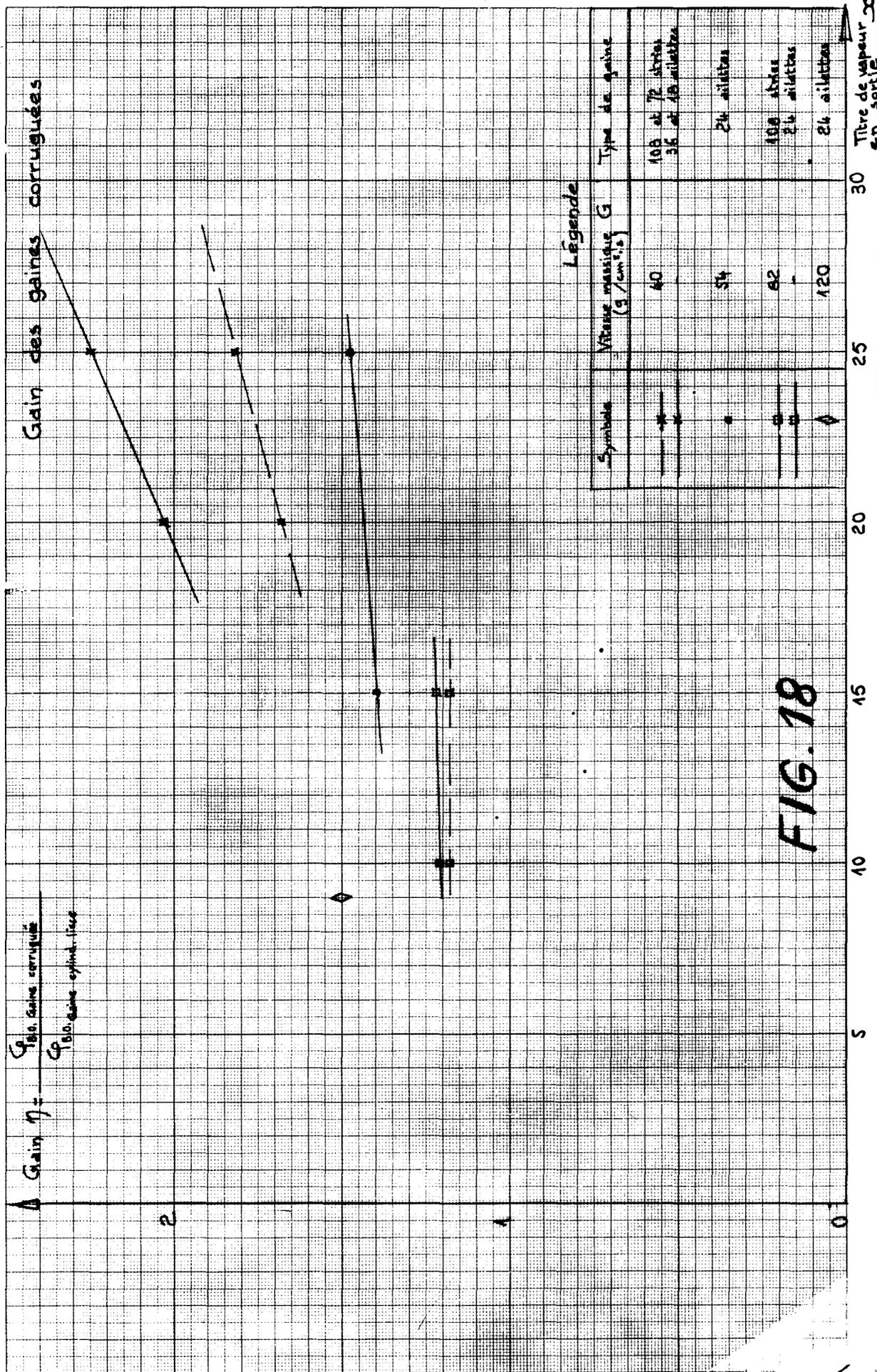
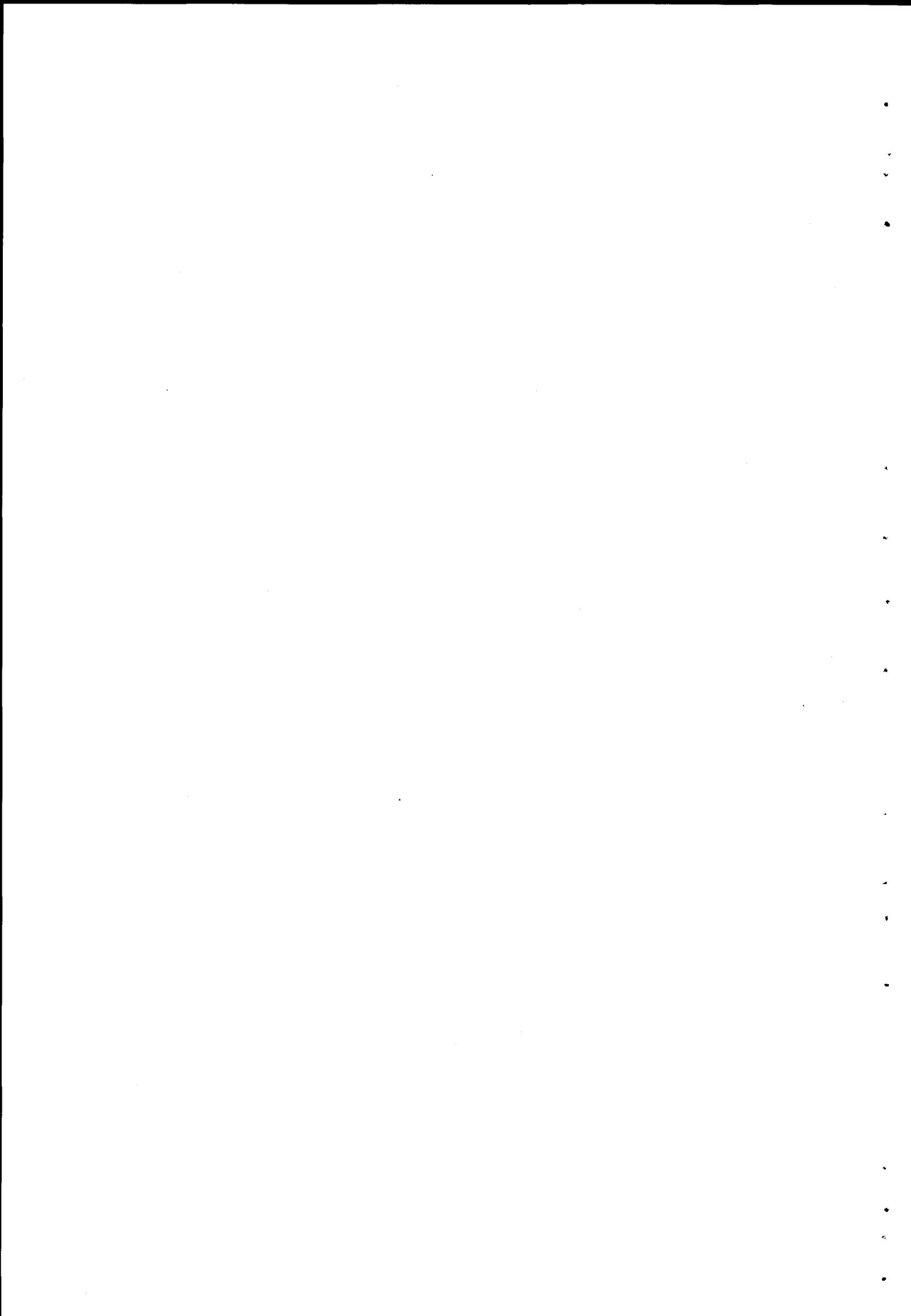
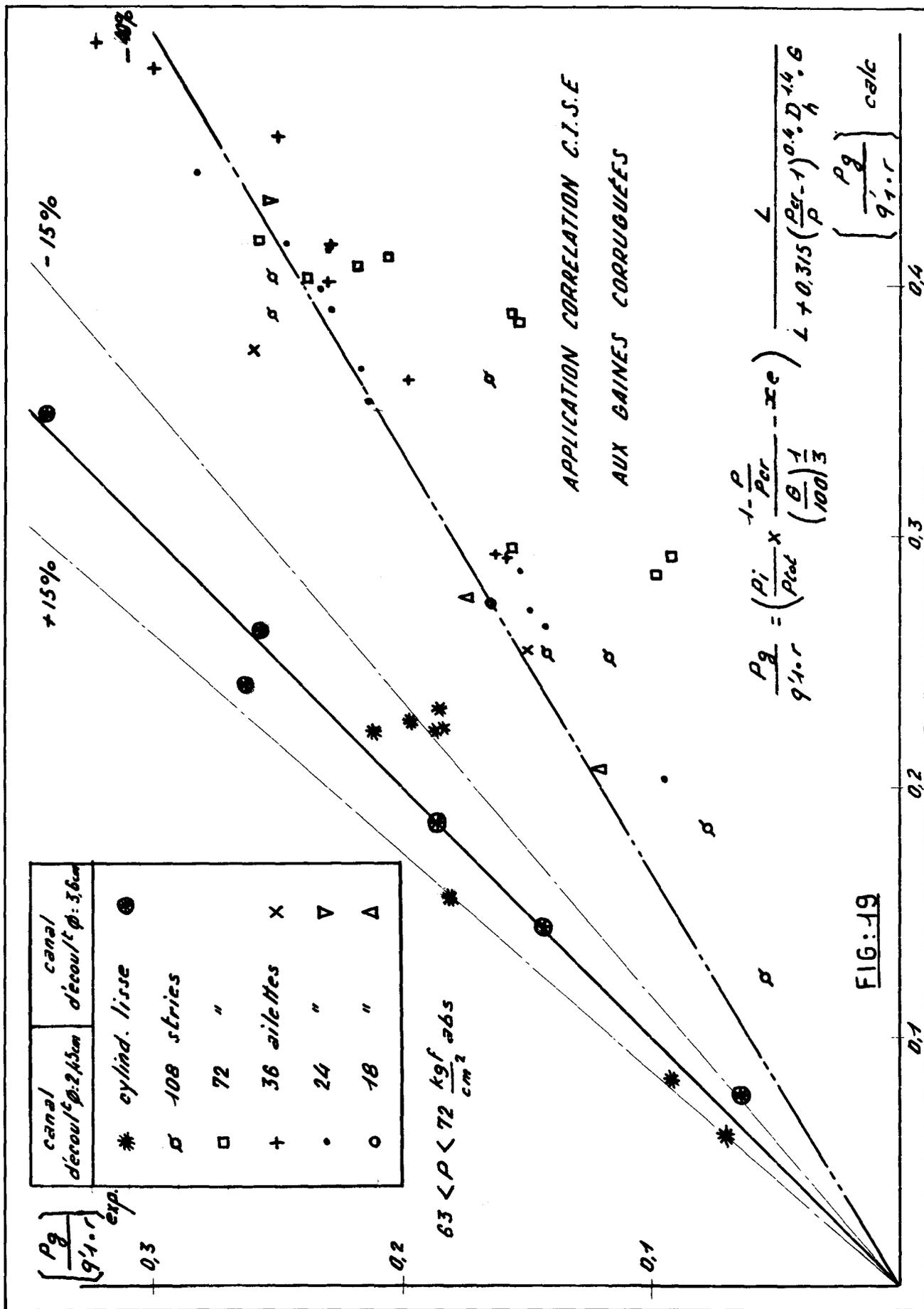


FIG. 18





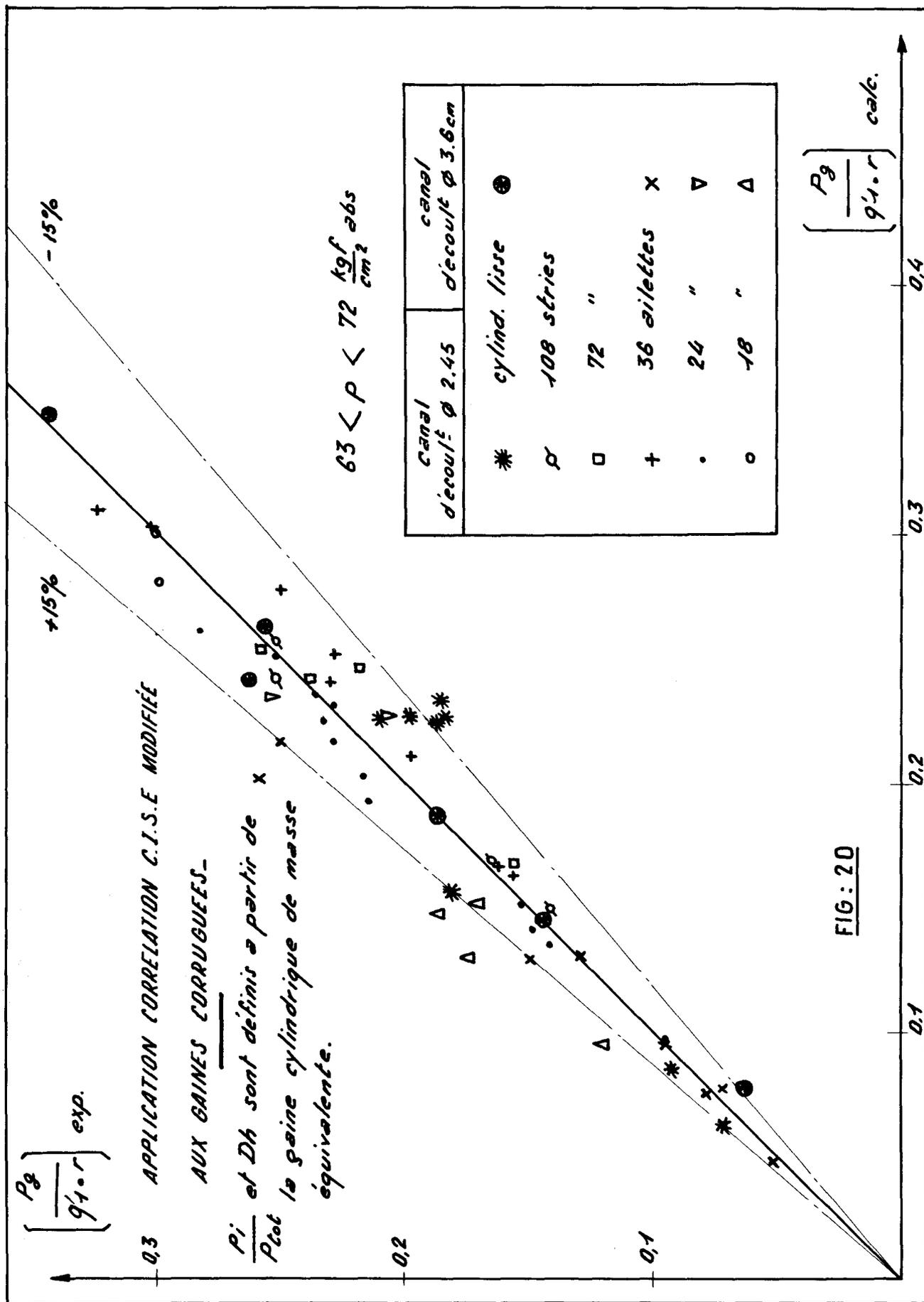


FIG: 20

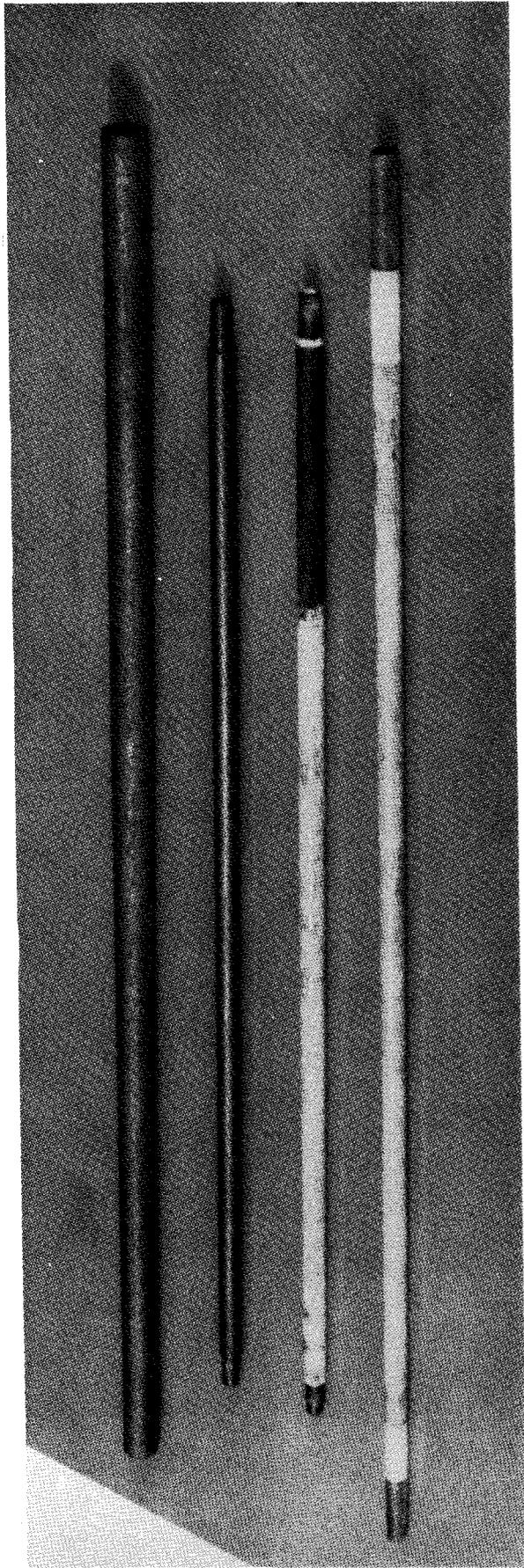


Fig. A.1.1

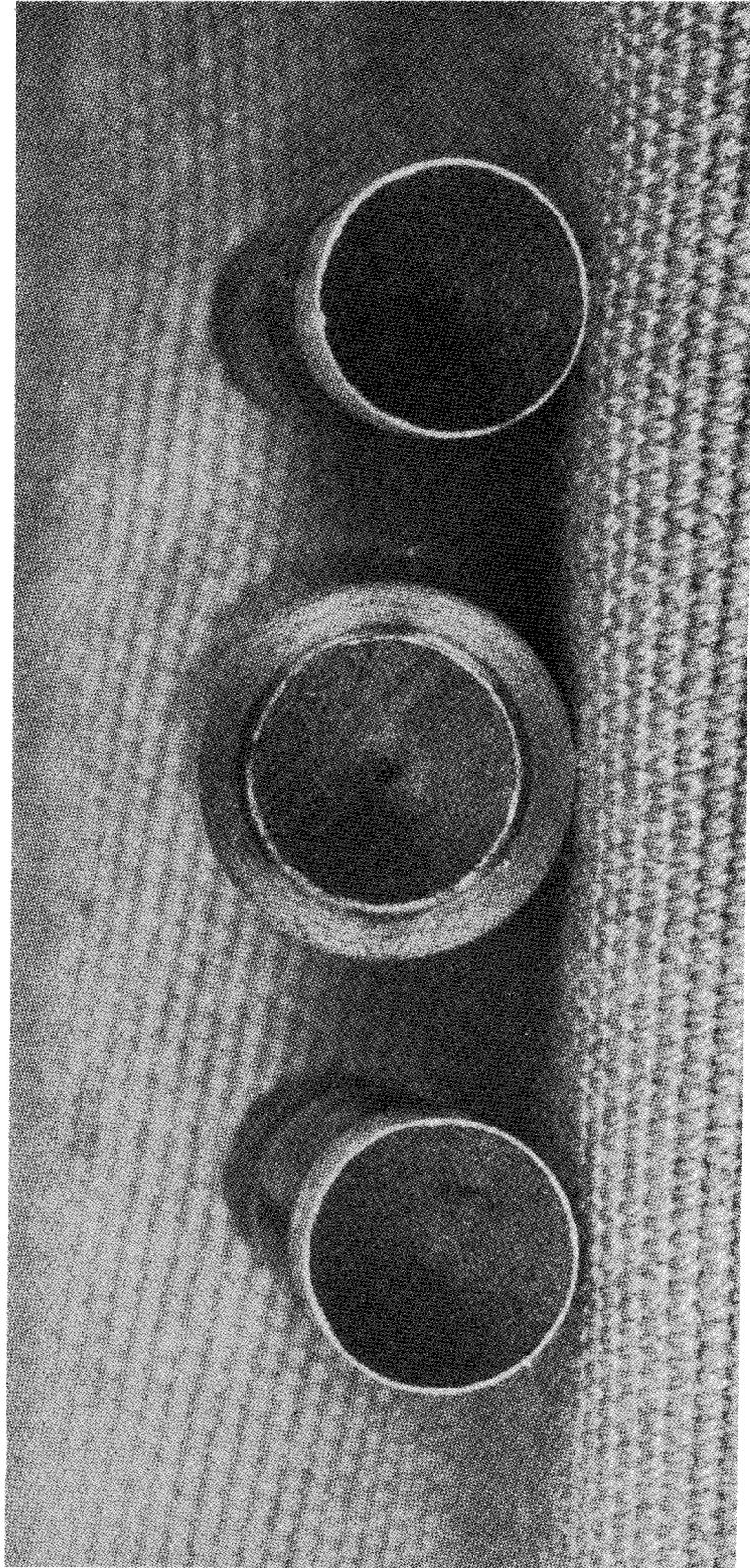


Fig. A.1.2

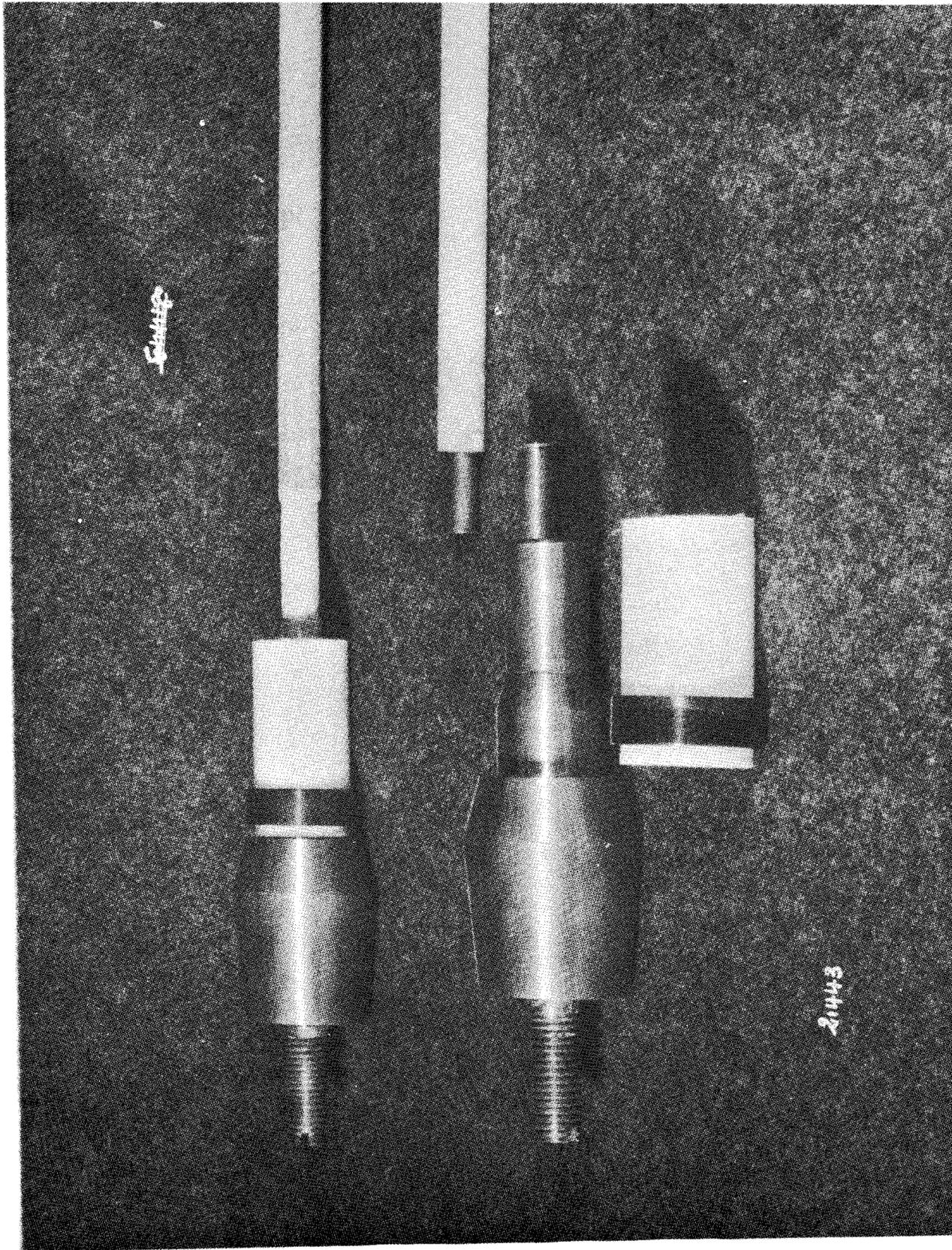


Fig. A.1.3

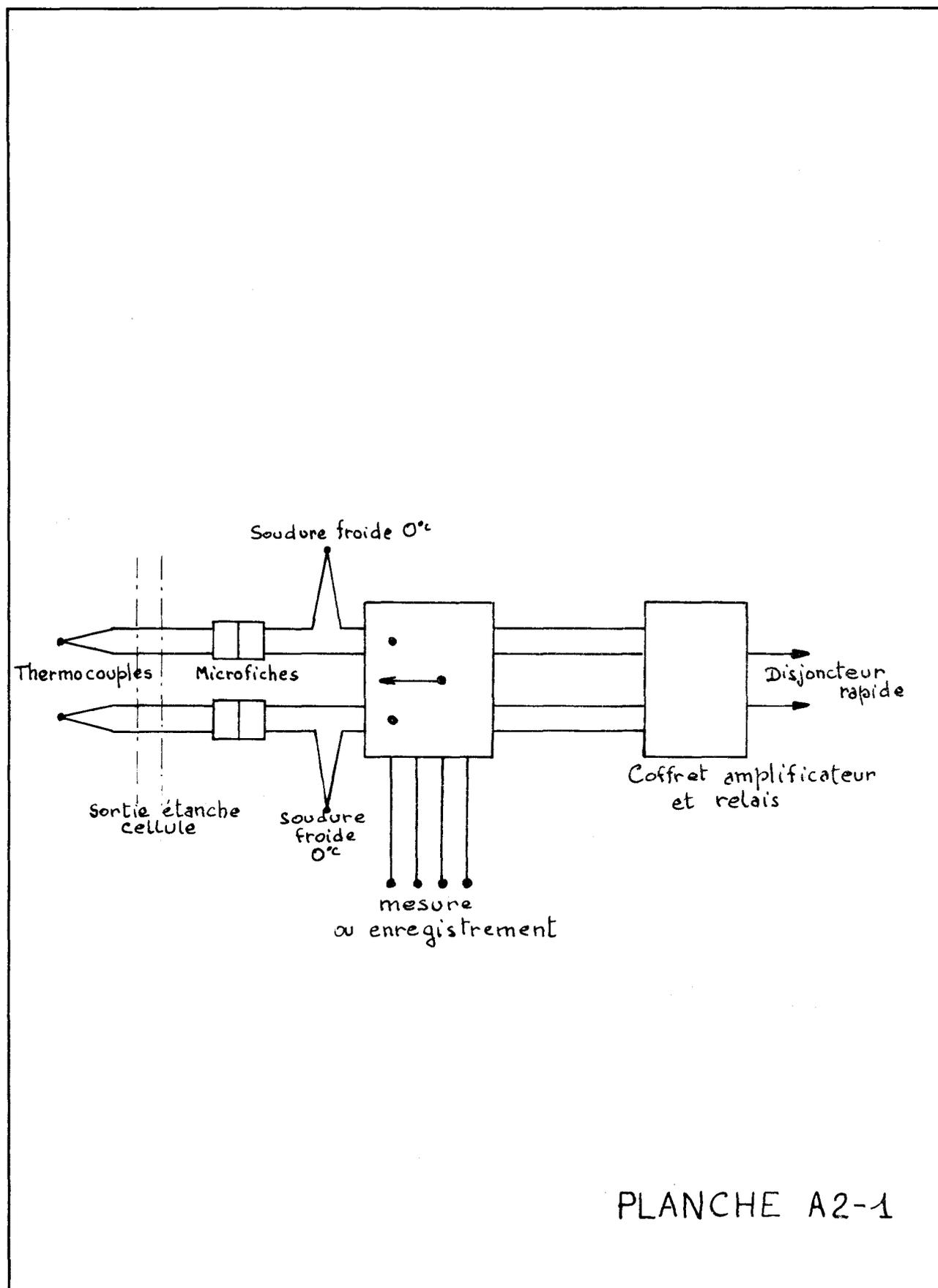


PLANCHE A2-1

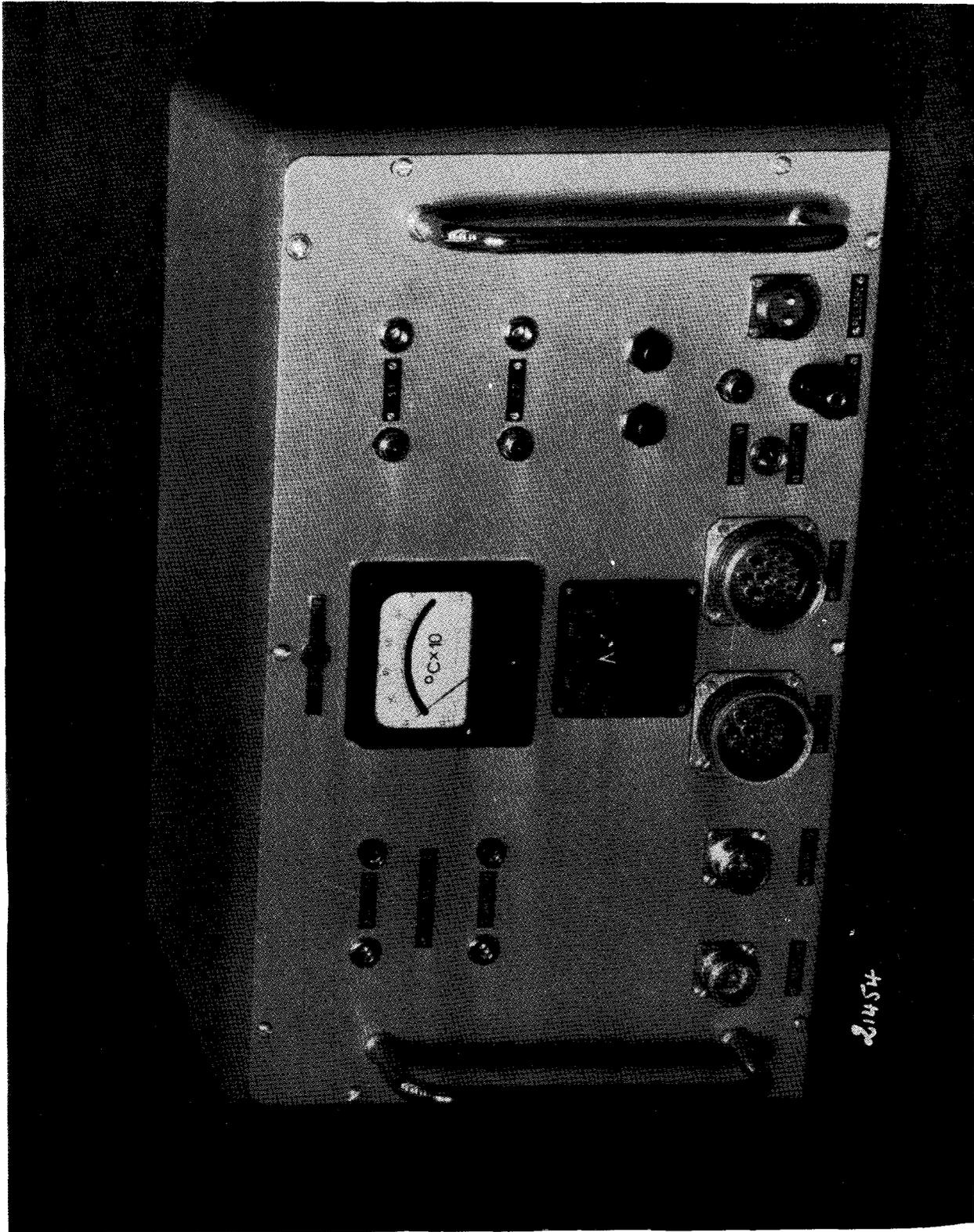


FIG. A 2.2

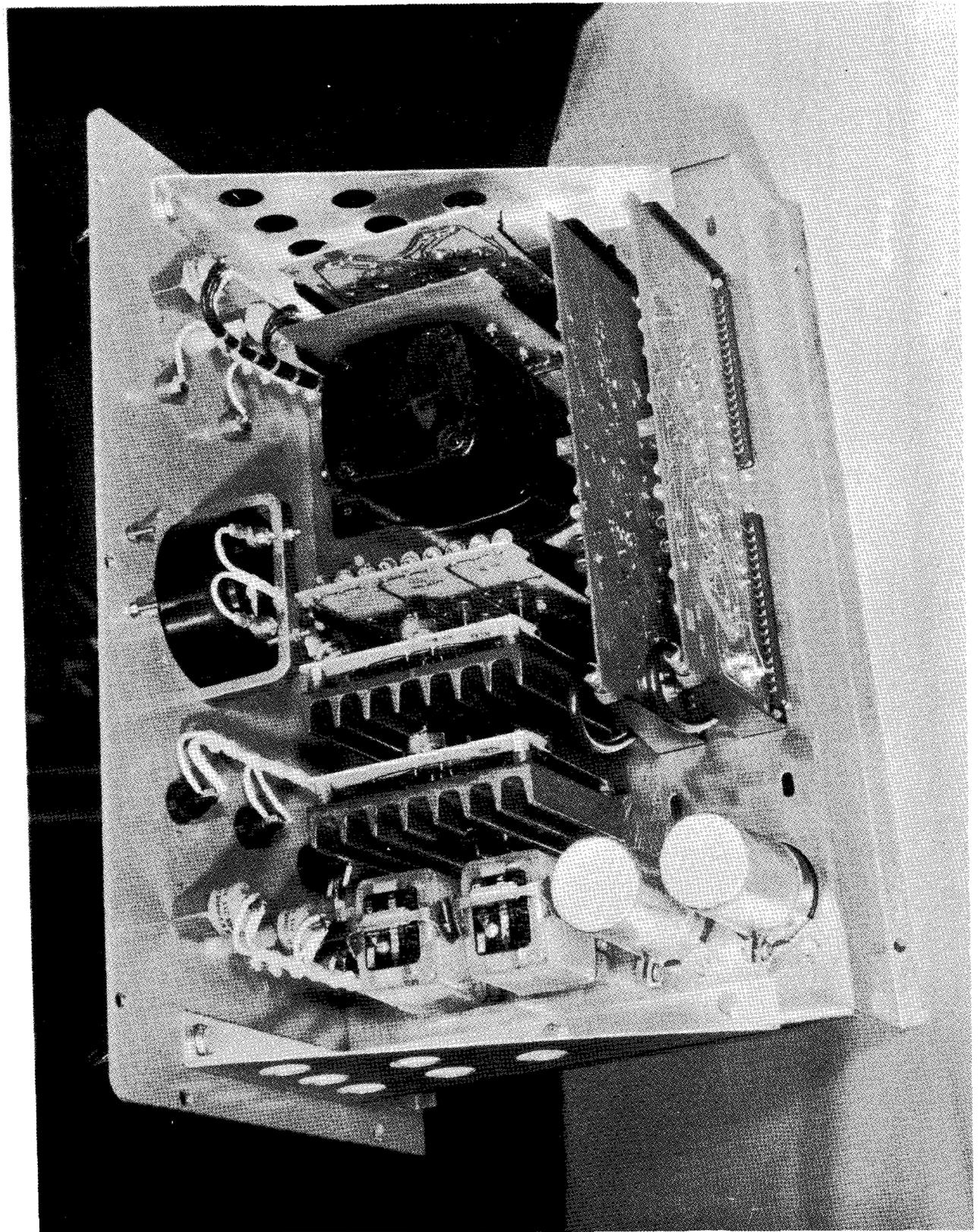


Fig. A.2.3



DÉPARTEMENT D'ÉTUDES NUCLEAIRES

SYNOPTIQUE
DE L'AMPLIFICATEUR
DE SECURITE
POUR THERMO-COUPLES

201814 P

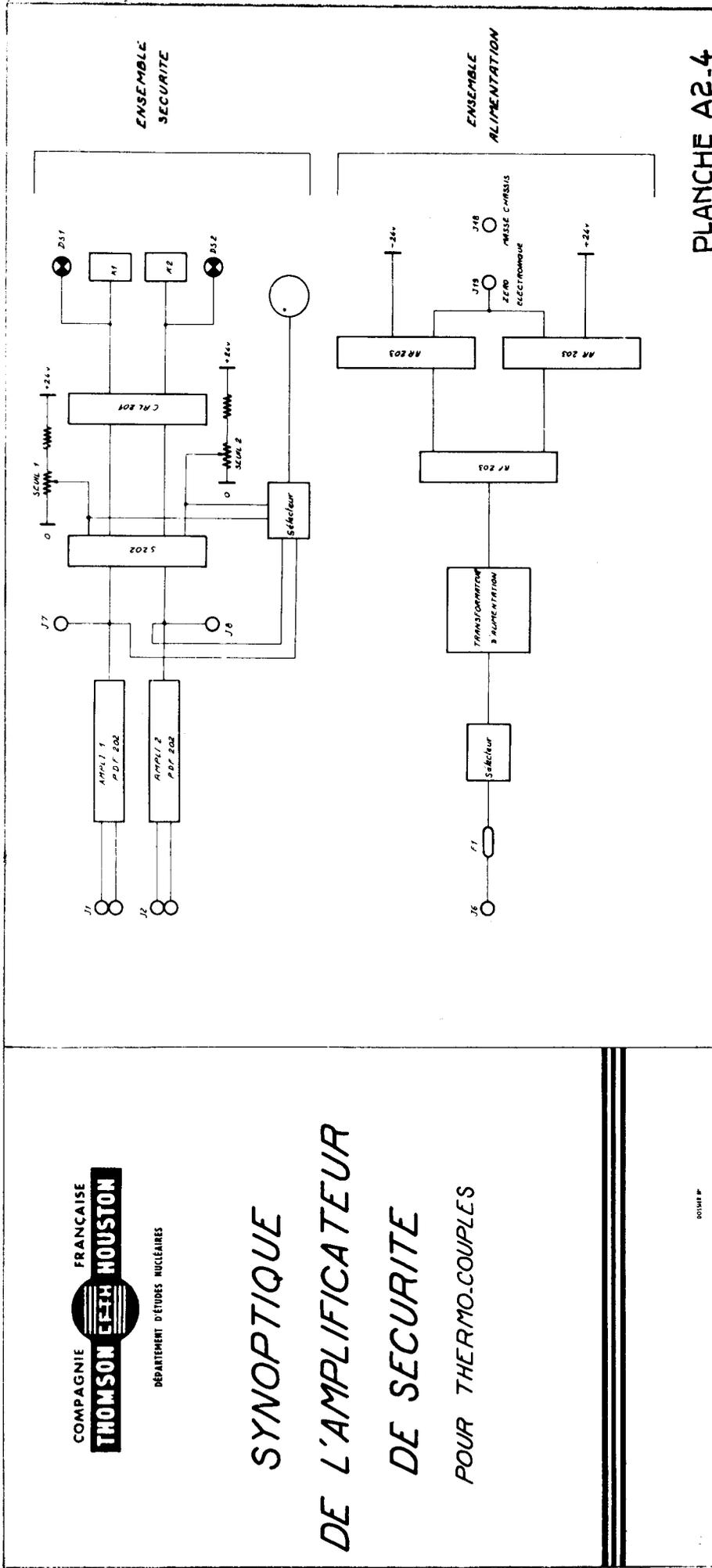
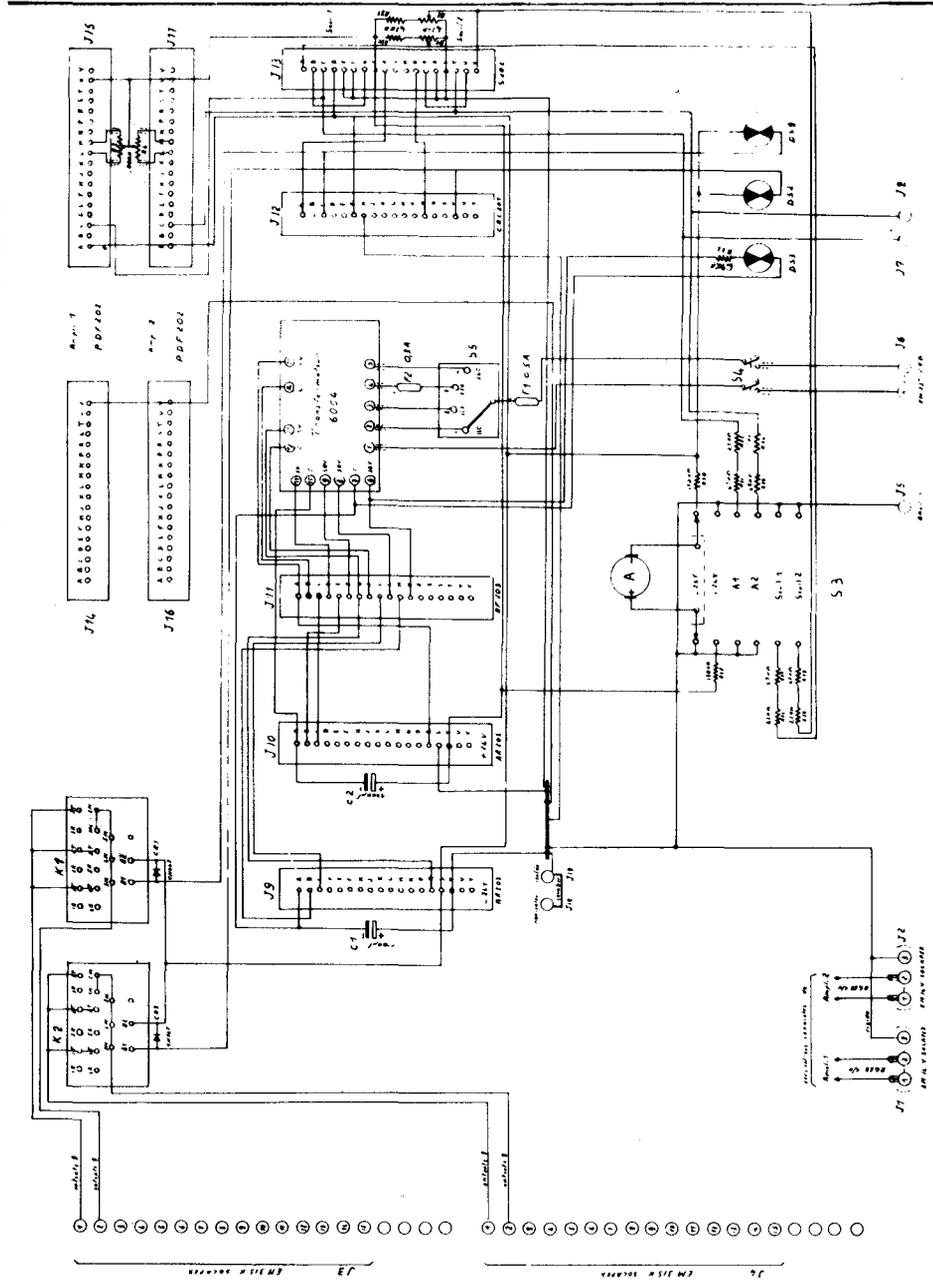


PLANCHE A2.4



Du RIO 325 LMF. N° 18 10 W.
 Du RT 4 24. Siffonnet type DEL aux-App. 4.
 Du RT 4 24. en feu rouge.
 Fil de cuivre : section 0,5 mm.
 Fil de nickel : section 7 à 10 mm.
 J1-J15: 2000 - 2000 02.



**AMPLIFICATEUR
 DE SECURITE
 POUR**

THERMO-COUPLES
 - Schéma de câblage -

TEMPS DE REPONSE - Détecteur de B.O. - C.F.T.H.-

Vitesse de défilement: 6000 cm/mn.

Appareil A.C.B. A0 300

U entrée redresseurs

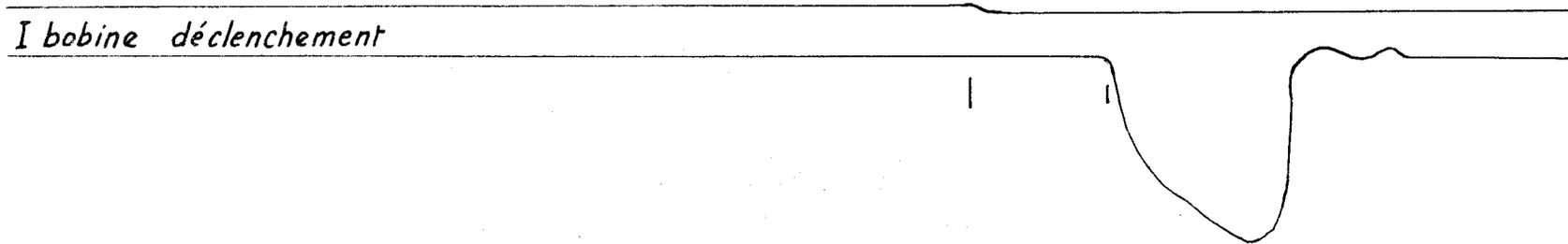


U continu sur barres



Signal

I bobine déclenchement



| 43 ms |

PLANCHE A2.6

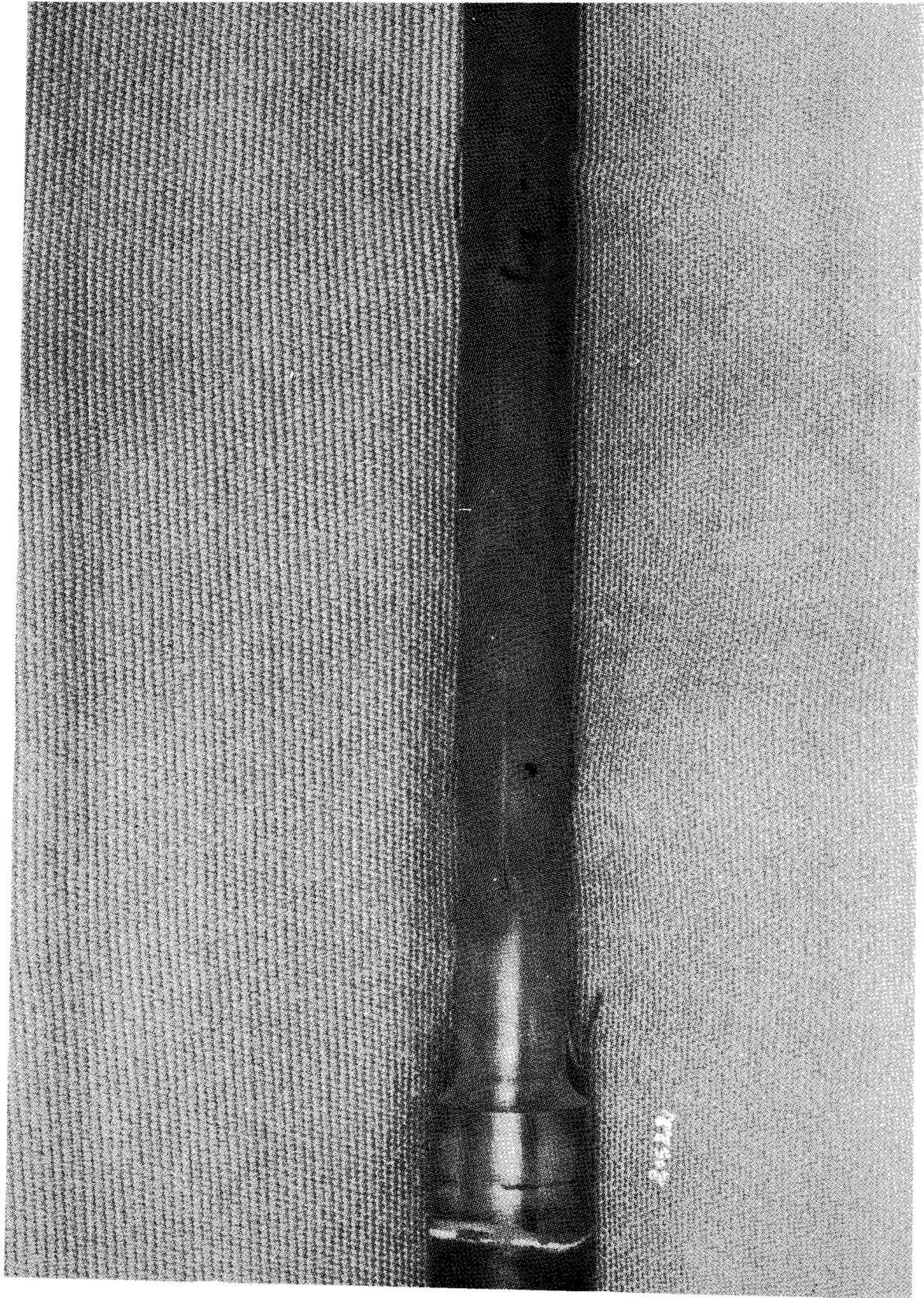


Fig. A.2.7

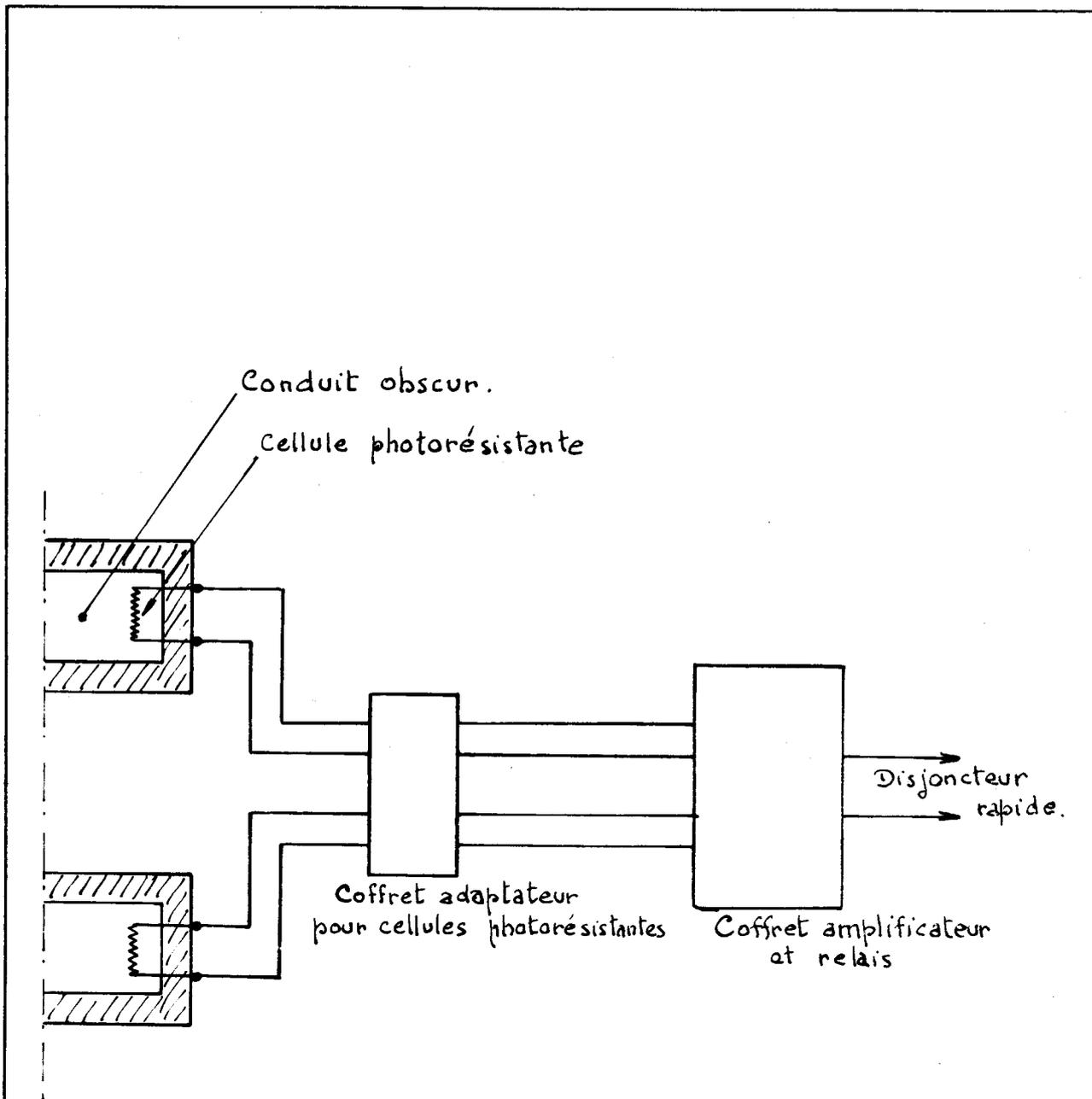
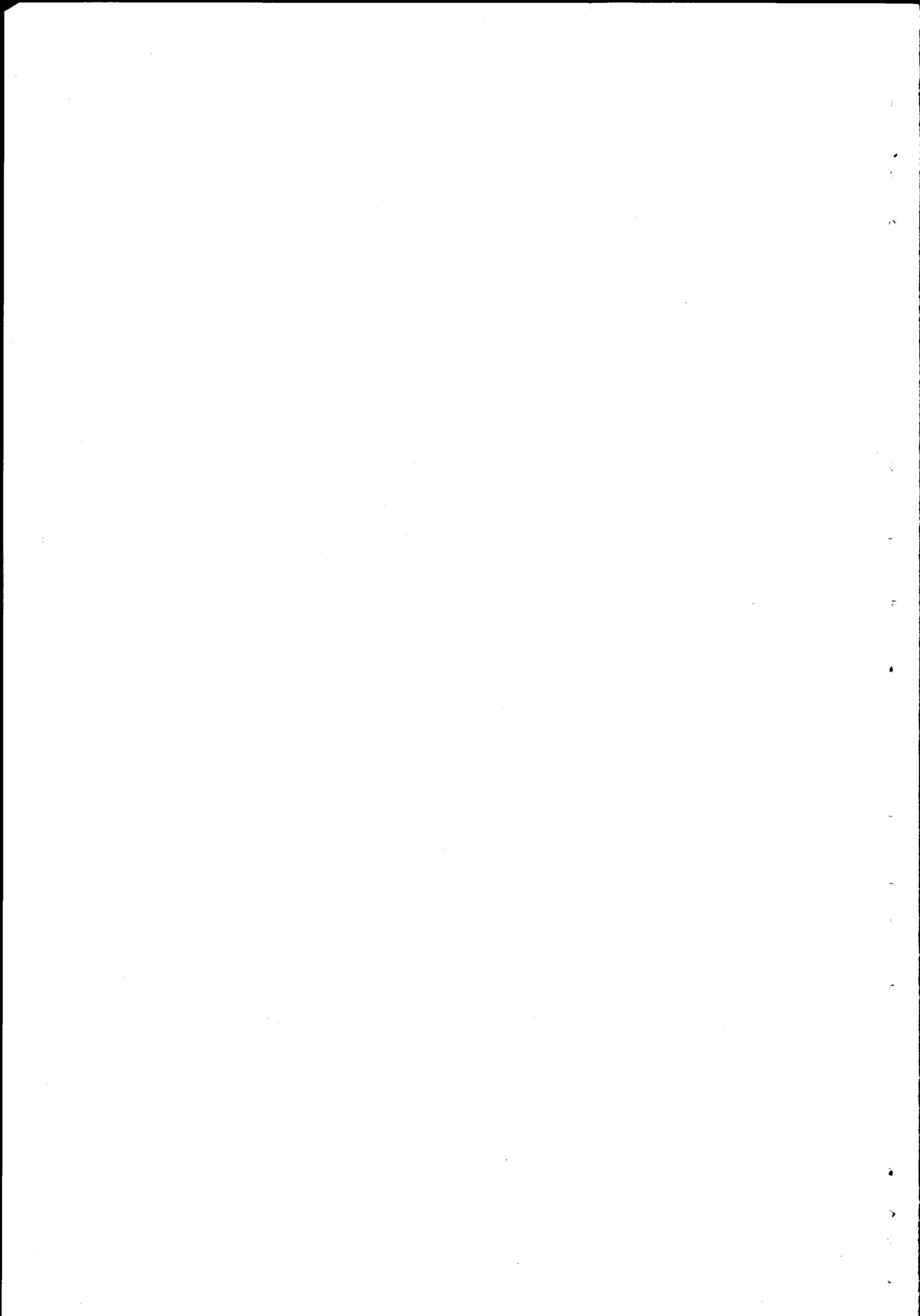
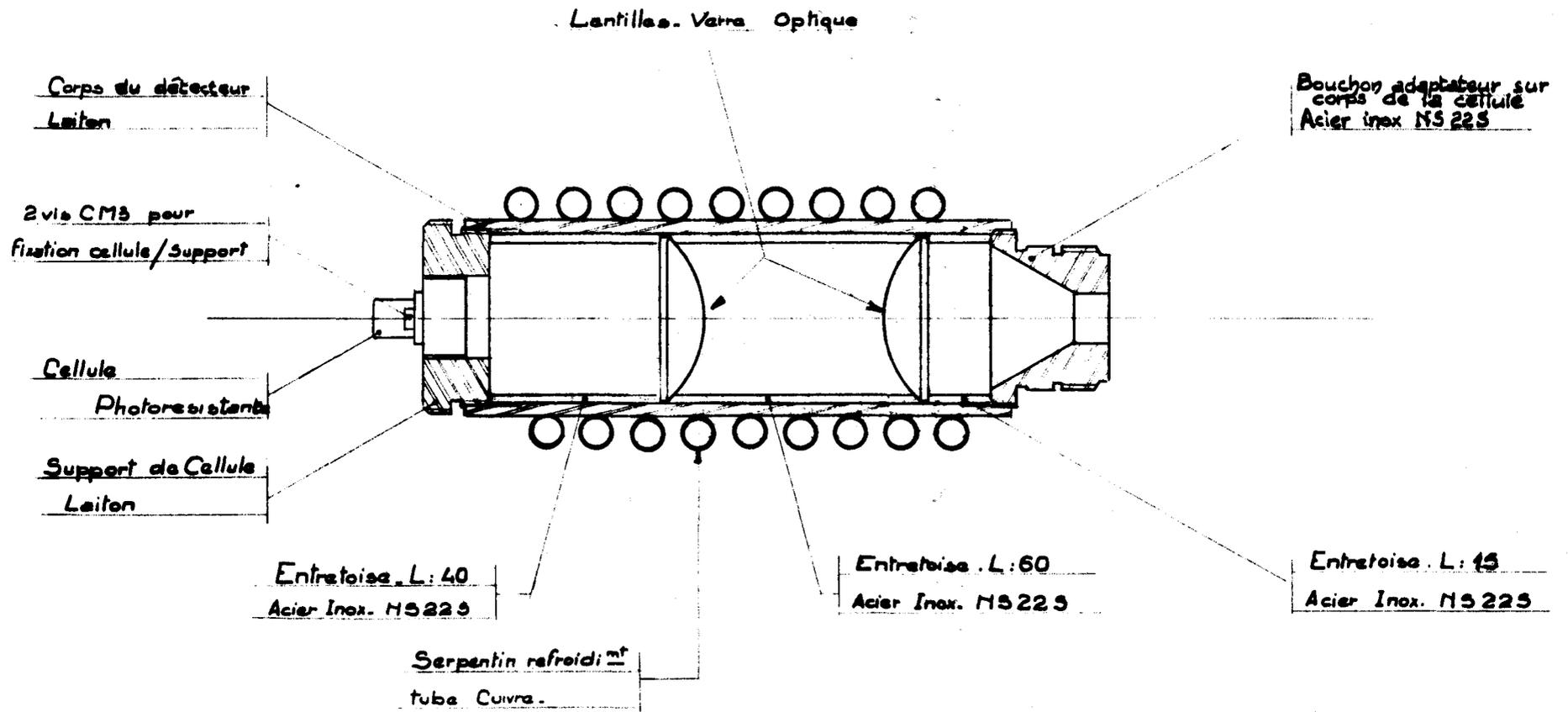


PLANCHE A2-8

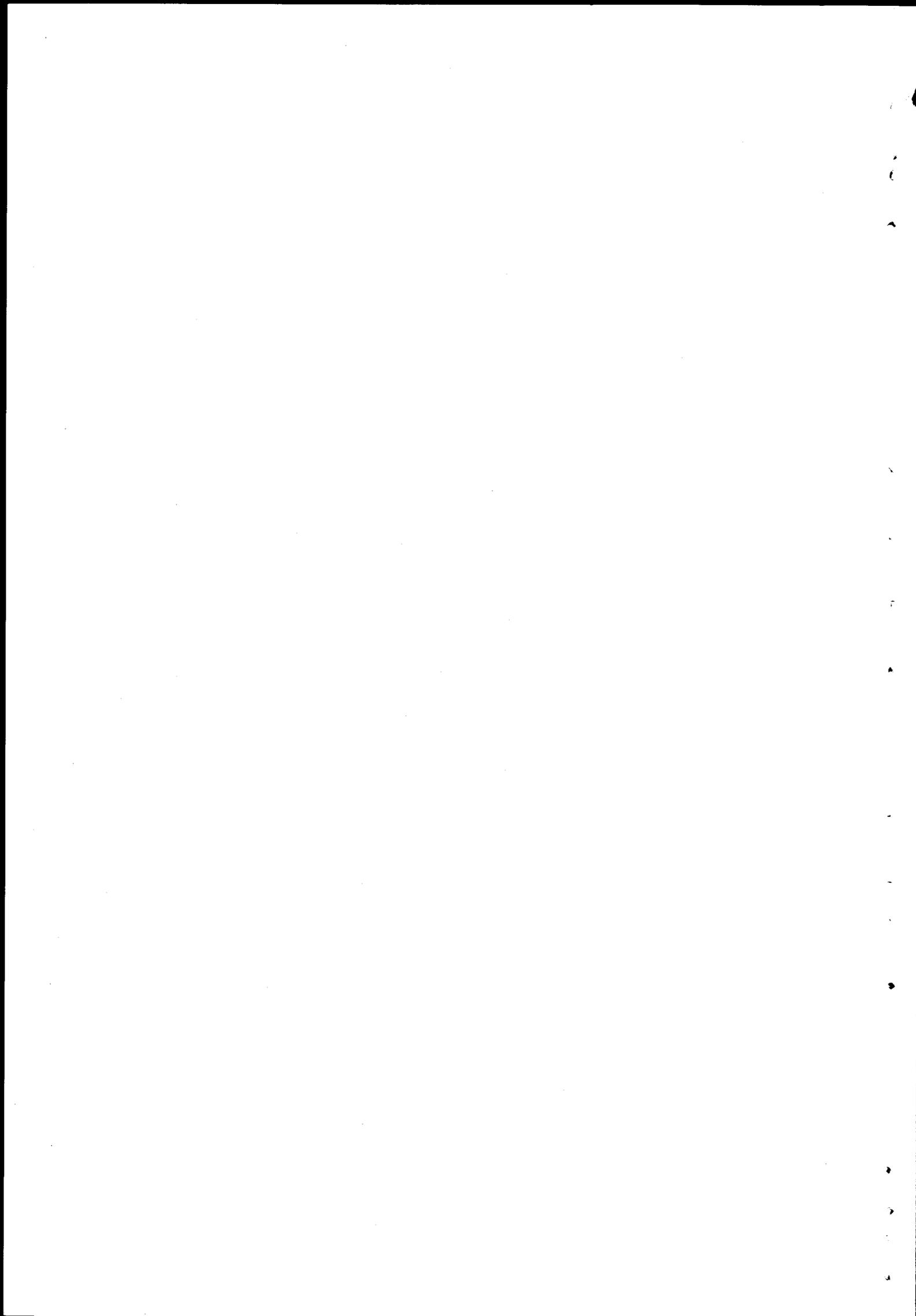




N° Plan 8.465-006
 N° Rev. : 0 rev. 005

DETECTEUR de B.O.

PLANCHE A2.9



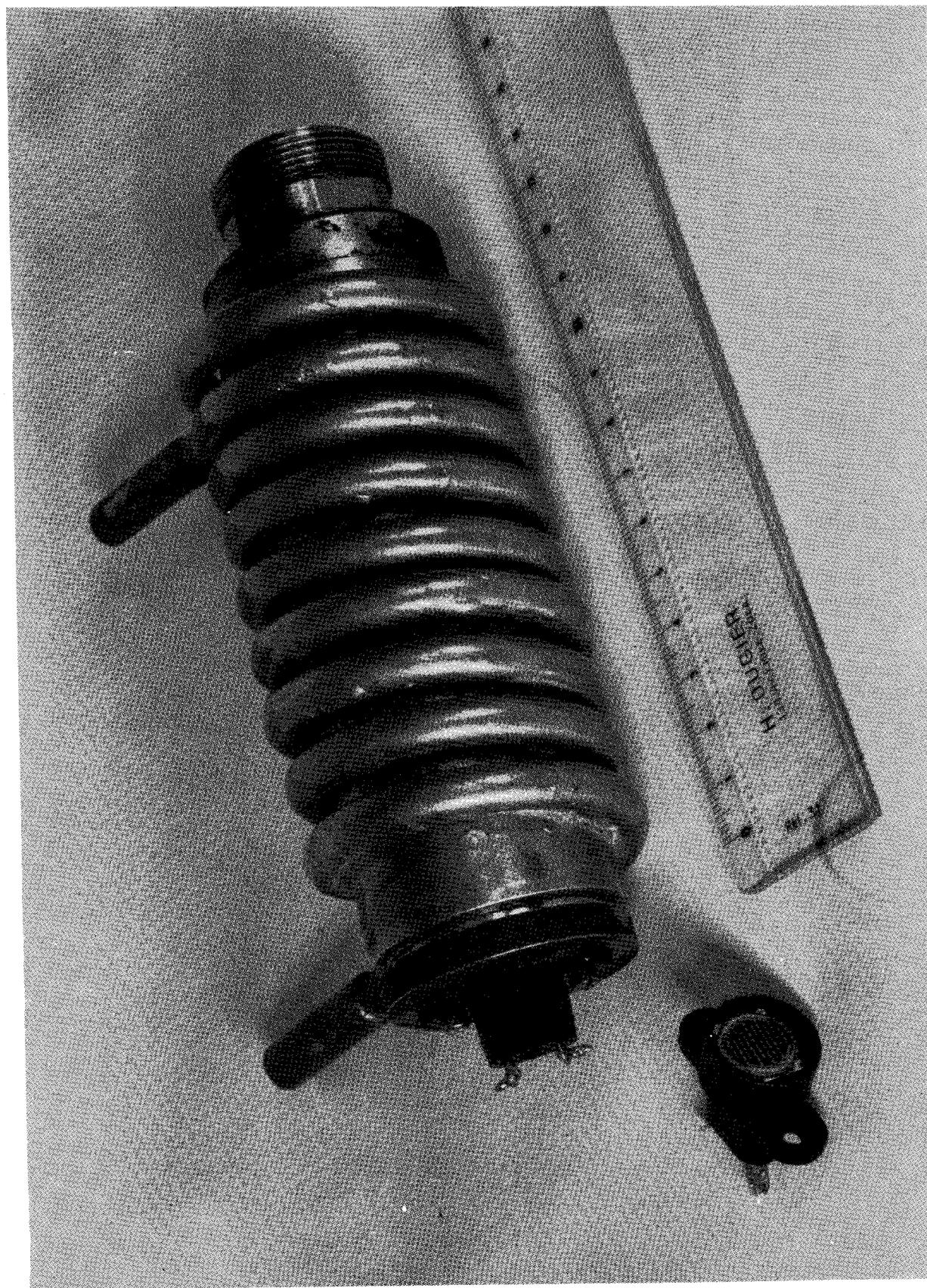


Fig. A.2.10

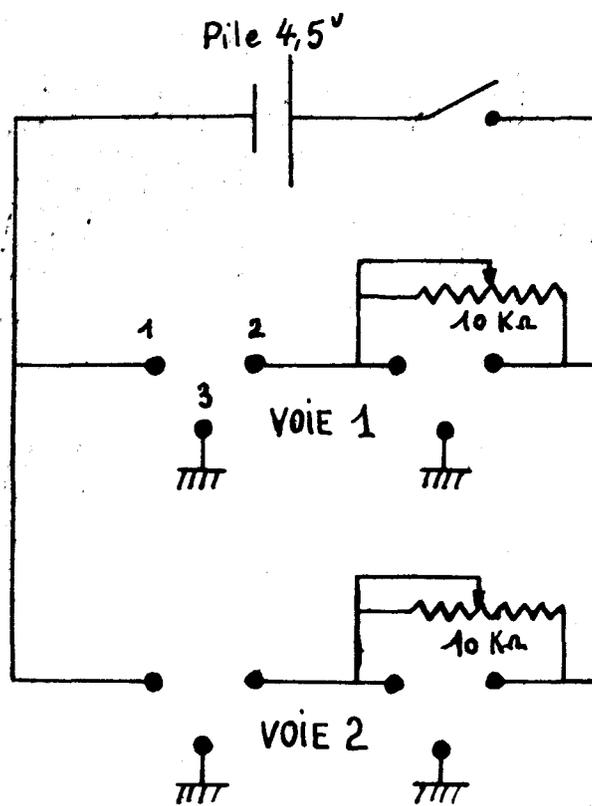


PLANCHE A2.11

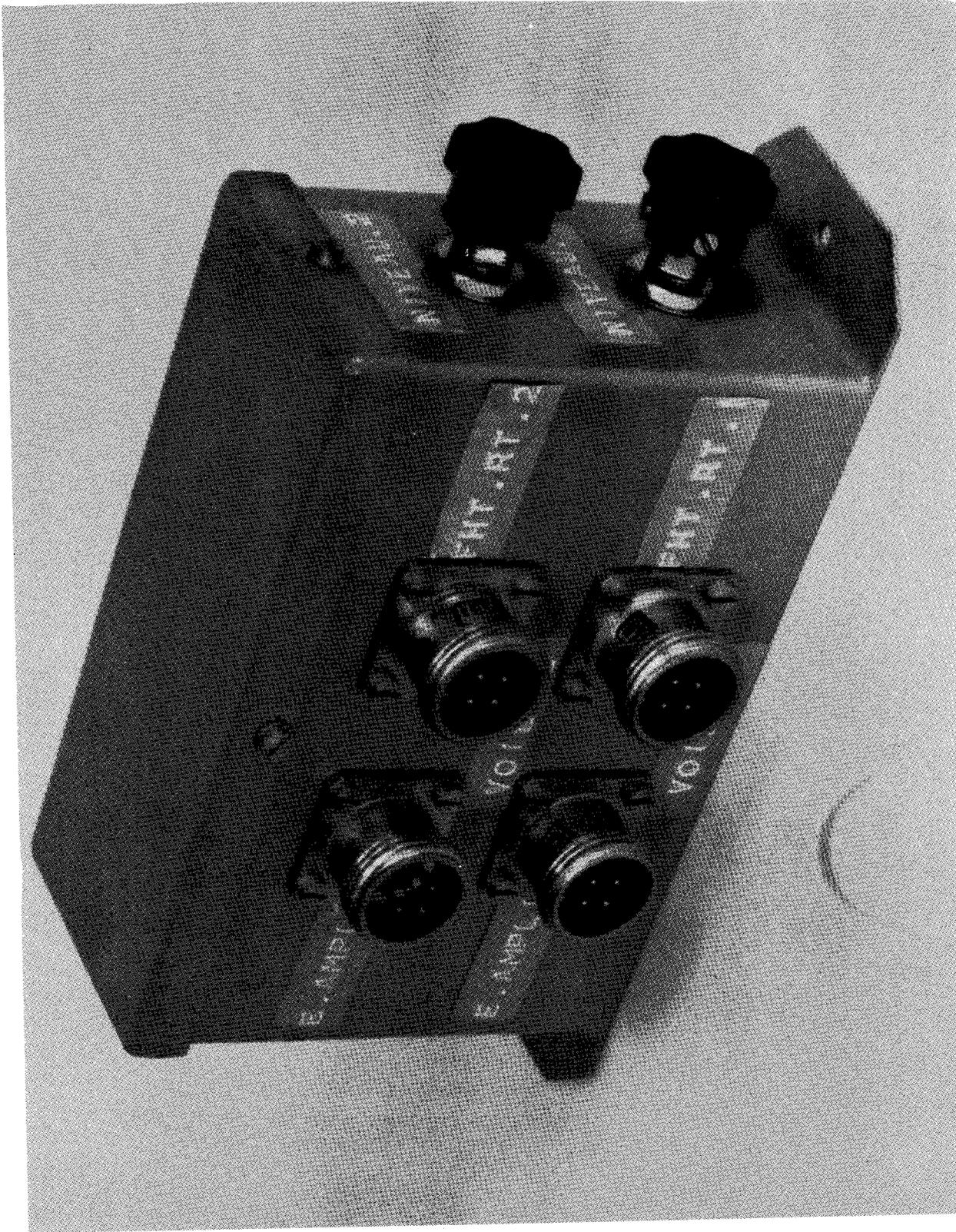
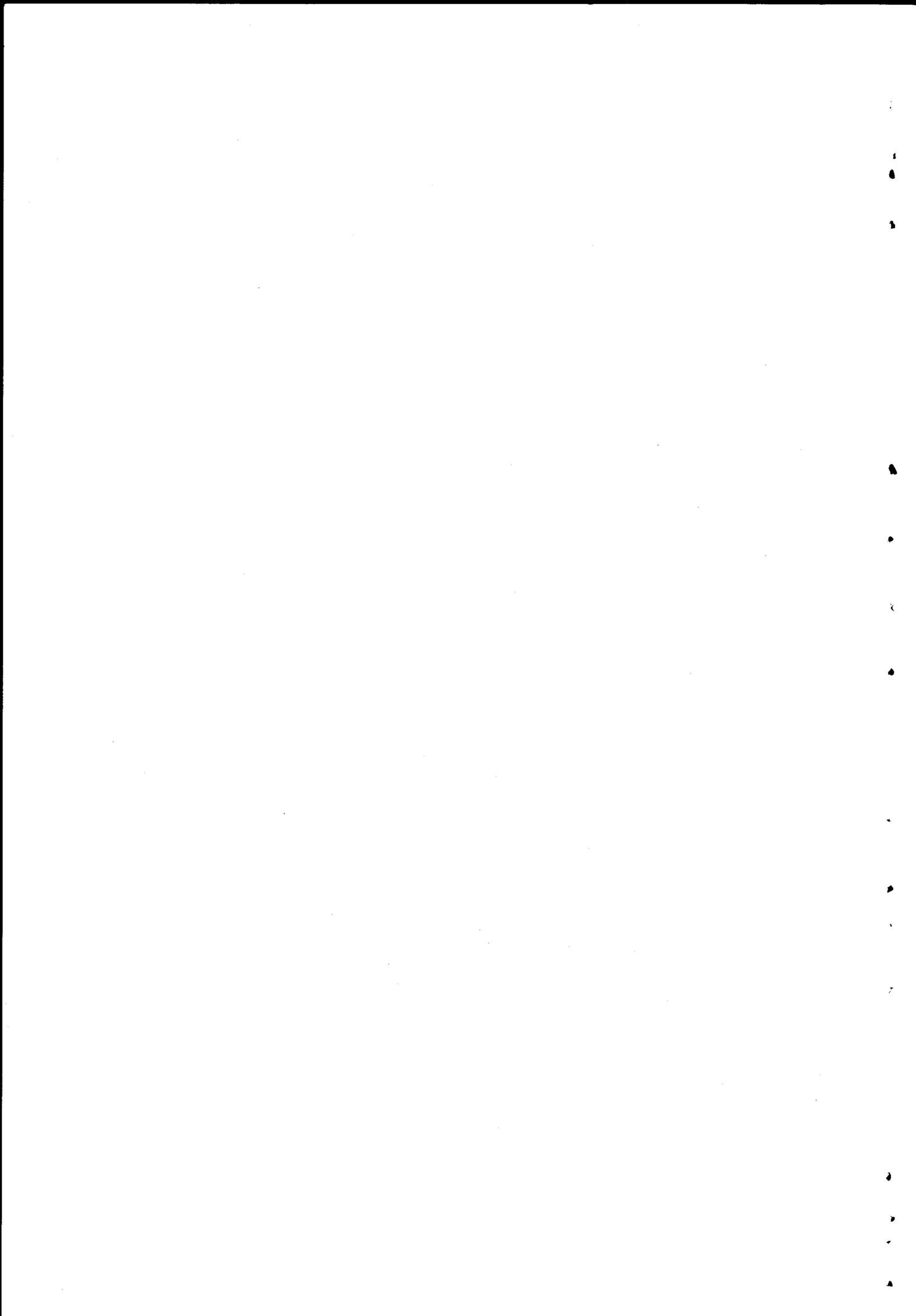


Fig. A.2.12



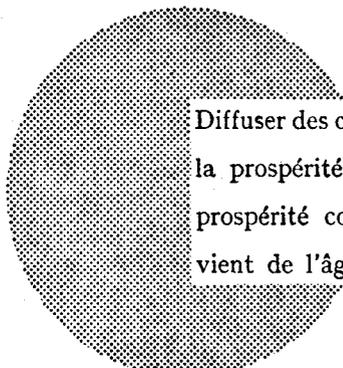
AVIS AU LECTEUR

Tous les rapports Euratom sont signalés, au fur et à mesure de leur publication, dans le périodique mensuel **EURATOM INFORMATION**, édité par le Centre d'information et de documentation (CID). Pour souscrire un abonnement (1 an : FF 75, FB 750) ou recevoir un numéro spécimen, prière d'écrire à :

Handelsblatt GmbH
"Euratom Information"
Postfach 1102
D-4 Düsseldorf (Allemagne)

ou à

Office de vente des publications
des Communautés européennes
2, Place de Metz
Luxembourg



Diffuser des connaissances c'est distribuer de la prospérité — j'entends la prospérité collective et non la richesse individuelle — et cette prospérité contribue largement à la disparition du mal qui nous vient de l'âge des ténèbres.

Alfred Nobel

BUREAUX DE VENTE

Tous les rapports Euratom sont vendus dans les bureaux suivants, aux prix indiqués au verso de la première page de couverture (lors de la commande, bien indiquer le numéro EUR et le titre du rapport, qui figurent sur la première page de couverture).

OFFICE CENTRAL DE VENTE DES PUBLICATIONS DES COMMUNAUTES EUROPEENNES

2, place de Metz, Luxembourg (Compte chèque postal N° 191-90)

BELGIQUE — BELGIË

MONITEUR BELGE
40-42, rue de Louvain - Bruxelles
BELGISCH STAATSBLAD
Leuvenseweg 40-42, - Brussel

LUXEMBOURG

OFFICE CENTRAL DE VENTE
DES PUBLICATIONS DES
COMMUNAUTES EUROPEENNES
9, rue Goethe - Luxembourg

DEUTSCHLAND

BUNDESANZEIGER
Postfach - Köln 1

NEDERLAND

STAATSDRUKKERIJ
Christoffel Plantijnstraat - Den Haag

FRANCE

SERVICE DE VENTE EN FRANCE
DES PUBLICATIONS DES
COMMUNAUTES EUROPEENNES
26, rue Desaix - Paris 15^e

ITALIA

LIBRERIA DELLO STATO
Piazza G. Verdi, 10 - Roma

UNITED KINGDOM

H. M. STATIONERY OFFICE
P. O. Box 569 - London S.E.1

EURATOM — C.I.D.
51-53, rue Belliard
Bruxelles (Belgique)