

PREMIER MINISTRE
COMMISSARIAT A
L'ÉNERGIE ATOMIQUE

**EXPÉRIENCES PRÉLIMINAIRES
A LA CONSTRUCTION DE LA PILE
RAPSODIE**

par

L. VAUTREY et C. P. ZALESKI

Rapport CEA N° 2192

1962

CENTRE D'ÉTUDES
NUCLÉAIRES DE CADARACHE

CEA 2192 - VAUTREY L. et ZALESKI C.P.

EXPERIENCES PRELIMINAIRES A LA CONSTRUCTION DE LA PILE RAPSODIE
(1962)

Sommaire. - Avant d'entreprendre la réalisation des divers éléments du réacteur décrit dans le rapport "Réacteur rapide surrégénérateur RAPSODIE", maintes études expérimentales, d'ordre hydraulique, thermique et mécanique ont été faites ou sont envisagées pour vérifier la validité des principes adoptés dans l'avant-projet.

Ce mémoire traite des plus importants :

1. Etudes d'éléments de circuits de refroidissement : pompes à sodium (mécaniques ou électromagnétiques), échangeurs Na-NaK et NaK-air, appareils de mesures (débits, températures), circuits de purification du sodium, etc.

2. Etudes de refroidissement des assemblages combustibles et fertiles; a) étude du refroidissement par le sodium, menée à l'aide de maquettes hydrauliques (échelle 1 ou supérieure à 1), reproduisant l'écoulement du fluide de refroidissement dans les tuyauteries, à l'amont des éléments combustibles et fertiles et à l'intérieur de ceux-ci; b) étude du refroidissement par gaz et par immersion dans le plomb, utilisé pendant les opérations de la manutention et de stockage.

/...

CEA 2192 - VAUTREY L. et ZALESKI C.P.

EXPERIMENTS PRIOR TO CONSTRUCTION OF THE RAPSODIE REACTOR (1962)

Summary. - Before proceeding to the construction of the various reactor components described in the paper 'Fast Breeder Reactor 'Rapsodie'', many experimental studies of a hydraulic, thermal and mechanical character have been carried out, or are under consideration, to test the validity of the principles adopted in the Preliminary Project.

This paper deals with the most important of these :

1. Studies of coolant circuit components : sodium pumps (mechanical or electromagnetic), Na-NaK and NaK-air heat exchangers, measuring instruments (flow-rates, temperatures), sodium purification circuits, etc.

2. Studies in cooling of fuel and fertile assemblies :
a) study of the sodium cooling carried out by means of hydraulic mock-ups (scale of 1 : 1 or over) reproducing the flow of the coolant fluid in the piping, upstream from and inside the fuel and fertile elements.
b) study of the cooling by gas and by immersion in lead, employed during handling and storage operations.

3. Studies of special reactor devices : fusible rotating linkage, parts of the control rod mechanisms.

/...

3. Etudes de dispositifs spéciaux du réacteur : joint tournant liquéfiable, parties de mécanismes des barres de contrôle.

4. Etude du bloc pile et des circuits de refroidissement dans leur ensemble. Cette étude doit commencer à la fin de cette année. Les installations, en cours d'achèvement, reproduisent, à l'échelle 1, celles prévues dans le projet et comportent : le bloc pile auquel est associé un circuit de sodium à grand débit permettant les essais de durée et la réalisation de chocs thermiques et, en annexe, un circuit d'essai de barres de contrôle; l'installation complète des circuits de refroidissement de 1 MW et de 10 MW dont les performances, dans les différents cas de fonctionnement, pourront être vérifiées.

5. Etude de sécurité effectuée sur une maquette à l'échelle 3/10 de l'ensemble du bloc pile et de ses protections, dont l'objet est la limitation des conséquences d'une hypothétique libération d'énergie accidentelle, d'allure explosive.

4. Study of the reactor block and coolant circuits as a whole. This study is to begin at the end of the year. The mock-up, now nearing completion, reproduces on a scale of 1 : 1 the installation provided in the Preliminary Project and includes : the reactor block, to which is connected a high flow-rate sodium circuit, permitting of long-term tests and thermal shocks, and also, a control rod testing circuit; complete installation of the 1-MW and 10-MW coolant circuits, the performances of which it will be possible to check under various operational conditions.

5. A safety study carried out on a 3 : 10 scale mock-up comprising the whole of the reactor block and shielding, with the object of limiting the effects of any accidental liberation of energy of an explosive character.

Département de Recherche Physique

EXPERIENCES PRELIMINAIRES A LA CONSTRUCTION DE LA PILE RAPSODIE

par

L. VAUTREY et C.P. ZALESKI

Communication présentée au Congrès de Vienne

les 23-27 octobre 1961

POWER REACTOR EXPERIMENTS

- FRANCE -

EXPERIENCES PRELIMINAIRES A LA CONSTRUCTION DE LA
PILE RAPSODIE

L. VAUTREY - C.P. ZALESKI

La pile Rapsodie représente pour le programme atomique français, une réalisation nouvelle et originale par plusieurs points. Ce sera en France la première pile à neutrons rapides, la première pile chargée en combustible au plutonium, et la première pile refroidie par métal liquide.

Les caractéristiques de la pile ont d'ailleurs été choisies pour qu'elle constitue une expérience valable pour la réalisation des piles futures de la filière à neutrons rapides. La puissance a été fixée à 10 MW, avec possibilité d'un fonctionnement ultérieur à 20 MW. La puissance spécifique pour 10 MW sera de 0,35 MW/l., et le flux de neutrons au centre de $1,1 \cdot 10^{15}$ n/cm² . s. Grâce à ces caractéristiques, on se propose d'atteindre les trois objectifs suivants :

- 1 - Disposer d'un prototype expérimental, pour étudier les problèmes physiques et neutroniques posés par les piles à neutrons rapides.
- 2 - Construire un engin, dont la réalisation pose à l'échelle industrielle les problèmes techniques dont la solution sera nécessaire pour des piles plus puissantes.
- 3 - Disposer d'une puissance spécifique suffisante pour que la pile serve de banc d'essai pour les éléments combustibles des piles suivantes.

Etant donnés ces objectifs assez ambitieux pour une première réalisation, et pour tenir compte de la nouveauté des problèmes que cette pile nous posait, il a été décidé dès l'avant projet d'effectuer de nombreux essais et en particulier de construire des maquettes en vraie grandeur de tous les éléments importants de la pile. Il importe de bien préciser qu'il ne s'agit pas seulement d'essais destinés à mettre au point des techniques; il s'agit avant d'entreprendre la construction de la pile, de s'assurer séparément du bon fonctionnement de ses différentes parties constitutives. Ceci signifie, bien entendu, que les plans de la pile et de ses annexes importantes ont dû être étudiés et dessinés pour la conception même des essais et avant la réalisation de ces essais. Toutefois, les plans de la pile ne seront fixés dans tous leurs détails qu'après obtention des résultats d'essais, qui permettront d'apporter les modifications que l'expérience aura révélé nécessaires.

Cette façon de faire implique évidemment un certain allongement du planning de réalisation de la pile (de l'ordre de 12 à 18 mois). Mais nous espérons réduire ainsi considérablement les mises au point et modifications quand la pile sera en fonctionnement. Nous pensons donc ne pas perdre de temps et peut-être en gagner.

Nous comptons d'ailleurs poursuivre l'expérimentation sur les installations d'essai les plus importantes pendant la construction de la pile et même après son démarrage. Ces installations constitueront ainsi, parallèlement à celles de la pile elle-même, un banc d'essai permanent plus souple et plus maniable.

. . . .

Nous exposons ici l'ensemble des principaux essais, qui ont été, sont, ou vont être effectués avant la construction de Rapsodie. Nous nous limitons, bien entendu, aux installations dont le fonctionnement prépare directement celui de la pile, en laissant de côté toutes les recherches de base ou fondamentales.

Les études expérimentales relatives à Rapsodie sont menées par le Département de Recherche Physique (Chef du Département, Monsieur G. VENDRYES). Les études d'écoulement sur les aiguilles combustibles sont sous la responsabilité du Département du Plutonium (Chef du Département, Monsieur E. GRISON).

Différentes parties de ces études expérimentales ont été confiées par contrat à des organismes extérieurs nationaux ou privés : Chantiers de l'Atlantique, Conservatoire National des Arts et Métiers, Electricité de France, Fives Lille, G.A.A.A., L.C.H.F., Service des Poudres, Sogréah, SFAC.

. . . .

Les préoccupations suivantes ont décidé des essais à effectuer :

- - Quand la décision de réaliser Rapsodie fut prise et que l'avant projet fut établi (en 1958), nous disposions déjà d'une expérience valable dans le domaine des métaux liquides : depuis 1953 en effet, des études systématiques avaient été entreprises concernant : les pompes électromagnétiques, les pompes mécaniques, les lois d'échanges thermiques, la construction des échangeurs intermédiaires ou générateurs de vapeur, les instruments de mesure, la purification etc... Toutefois, les installations prévues pour Rapsodie représentaient une grosse extrapolation par rapport à celles déjà réalisées. Nous n'avons pas voulu tenter cette extrapolation sans en vérifier expérimentalement la validité. Etant donné l'interdépendance des différents éléments et appareils constituant les circuits, et pour donner aux résultats tout leur sens, il fut décidé quels que soient les essais partiels, d'effectuer des tests globaux des deux installations de refroidissement de 1 et 10 MW respectivement.

- - Le refroidissement correct des divers assemblages combustibles et fertiles présente dans les piles à neutrons rapides, un aspect particulier du fait :
- de la concentration de la puissance dans un volume très faible de combustible, avec des densités de flux de chaleur très élevées.
 - des gradients de puissance très importants, c'est-à-dire du rapport considérable de la densité de puissance entre des points très proches l'un de l'autre.

Pour assurer la validité des solutions adoptées, des études expérimentales ont été décidées concernant :

- l'alimentation du sodium dans la zone d'entrée de la pile et la distribution correcte du fluide entre les différents assemblages.
- l'écoulement du sodium autour des aiguilles combustibles, qui conditionne leur refroidissement.

- la sortie du sodium en haut des assemblages et l'écoulement du liquide dans la partie supérieure de la pile , vers les deux tuyauteries de sortie.

-- Les assemblages combustibles et fertiles de Rapsodie reposent par leur poids sur une épaisse plaque inférieure appelée sommier. L'écoulement du sodium ayant lieu de bas en haut , il en résulte une poussée verticale (force d'envol) qui pourrait provoquer un soulèvement des assemblages. Ce problème nécessitait des essais précis dans des conditions réelles du fonctionnement.

-- La réalisation du coeur d'une pile rapide pose des problèmes mécaniques difficiles du fait des faibles jeux possibles entre les différents éléments et des gradients élevés de température susceptibles d'influer sur ces jeux au cours du temps , par suite de déformation d'une pièce par rapport à une autre. Il peut en résulter des problèmes délicats quant à la stabilité de la pile (déformation des assemblages) , ainsi que des difficultés mécaniques graves concernant le mouvement de barres de contrôle et de sécurité , ainsi que les opérations de chargement et de déchargement du combustible. Les variations brutales de températures susceptibles de se produire en régime transitoire et les chocs thermiques qui en résultent sont un facteur d'incertitude supplémentaire pour la bonne tenue des différentes parties du coeur et de la structure qui le supporte. La circulation du sodium chaud dans les assemblages et entre ceux-ci peut provoquer des vibrations , des usures , des grippages ou des collages. Toutes ces considérations nous ont paru justifier des essais , aussi proches que possible des conditions réelles destinés à vérifier le bon comportement mécanique de l'ensemble de la cuve et des éléments qu'elle contient.

- On a enfin voulu étudier expérimentalement , autant qu'il est possible de le faire , les conséquences que peut avoir sur l'installation l'accident nucléaire maximum imaginable.

Ces études ont été entreprises d'une part en ce qui concerne le bloc pile , c'est-à-dire l'ensemble coeur , couverture , cuve , protections et structure , d'autre part sur le bâtiment étanche qui enferme la pile et les installations primaires.

o o o o

Signalons enfin qu'il n'est question dans ce rapport que des essais à caractère technique. On a donc volontairement laissé de côté les études expérimentales concernant la propagation de flux de neutrons à longue distance (ces études sont relatives à la détermination des protections et des sources de chaleur qui y prennent naissance).

• • • •

Nota:

Ce rapport suppose connue la description de la pile et de l'ensemble de ses installations. Voir à ce sujet : Le Réacteur Rapide Surrégénérateur Rapsodie , par G.P. Zaleski et L. VAUTREY.

I - ETUDE EXPERIMENTALE CONCERNANT LA PILE PROPREMENT DITE.

Nous passerons en revue dans ce chapitre les essais suivants :

- Etudes hydrauliques de l'écoulement dans la cuve et les assemblages.
- Etudes des déformations d'assemblages combustibles sous l'effet de gradients thermiques et de réactions.
- Etude des joints liquéfiables des bouchons tournants.
- Etude de l'ensemble du bloc pile et des mécanismes de barres de contrôle.

REFROIDISSEMENT DU COEUR ET DE LA COUVERTURE DE LA PILE.

Les problèmes de refroidissement des assemblages combustibles ou fertiles par le sodium circulant dans la pile sont beaucoup plus des problèmes de mécanique des fluides que des problèmes thermiques purs. En conséquence, les études expérimentales touchant à ces problèmes ont été des études hydrauliques effectuées uniquement à l'eau, ce qui a permis des expérimentations et des mesures qui n'auraient pu être pensables avec du sodium (1).

Ces études ont porté essentiellement sur :

(1) Les essais hydrauliques ont été effectués par la SOGREAH

a) L'alimentation des assemblages,

Recherche d'un type de culotte de jonction capable de fonctionner avec des débits variables dans chaque branche.

· Choix d'un coude d'entrée à la base de la cuve

Forme à donner au ballon et au récupérateur

· Réglage des débits dans les différentes zones de la pile à l'aide de diaphragmes.

b) La définition de la géométrie optimale des assemblages compte tenu d'une part des problèmes thermiques, de l'autre d'un soulèvement possible des assemblages situés au centre de la pile et traversés par le débit le plus important.

c) La sortie du sodium de la pile :

- Influence du couvercle, situé au dessus du coeur sur le comportement du niveau libre dans la cuve, et sur l'écoulement du sodium vers les tuyauteries de sortie.
- Détermination de la cote des deux tuyauteries de sortie par rapport à celle du niveau libre dans la cuve.

Installations et principes des essais.

Tous les essais ont été effectués avec de l'eau en similitude de Reynolds pour les écoulements forcés et en similitude de Froude pour les écoulements avec surface libre. Trois maquettes de la pile ont été fabriquées :

Tout d'abord pour orienter les essais, on a réalisé une maquette à l'échelle 1/7. Cette maquette comprenait une petite cuve alimentée axialement à sa base. Une plaque percée d'orifices de sections différentes permettait d'assurer un réglage de débits reproduisant grossièrement les débits désirés dans les différentes zones. Cette maquette ne comportait qu'une seule canalisation de sortie.

En second lieu, une maquette à l'échelle 1/2 a été réalisée pour étudier la sortie du sodium de la pile. Cette maquette comportait une cuve munie de deux sorties diamétralement opposées et était comme la précédente munie d'une plaque percée d'orifices de sections différentes pour simuler les débits traversant les assemblages. Elle était de même alimentée axialement à la base. Cette maquette a permis de préciser la cote des tuyauteries de sortie du sodium et a révélé la nécessité d'un couvercle au dessus des assemblages centraux,

pour stabiliser la surface libre. Les photos placées en fin de texte montrent la surface libre lorsque le couvercle est en place ou non. Ce couvercle sera d'autre part utilisé pour y placer des thermocouples de mesure de la température du sodium à la sortie des assemblages. Il constitue enfin une sécurité contre un éventuel soulèvement des assemblages.

Enfin, pour l'étude de l'alimentation de la cuve on a construit une maquette à l'échelle 1/1 représentant fidèlement les dispositifs prévus pour la pile, de l'entrée du coude d'alimentation jusqu'au niveau de la partie inférieure du sommier. (Les éléments représentés sont ceux indiqués sur la figure I.1). L'échelle 1 a été choisie pour éviter les difficultés de fabrication de certains éléments, qui se seraient présentées dans une maquette plus réduite, en particulier pour certains diaphragmes dont le diamètre de l'orifice est de l'ordre du millimètre. Toute la partie située au dessus du sommier n'était pas représentée avec exactitude, mais néanmoins suffisamment fidèle pour que les conditions à l'aval n'aient pas de répercussions sur l'écoulement à l'amont. L'évacuation se faisait par un déversoir circulaire dans le haut de la cuve. Cette maquette a permis d'étudier pour un débit global simulé de sodium variant de 3 à 700 m³/h, les profils des vitesses à différents niveaux ainsi que la répartition des débits dans les différentes zones des assemblages (figure I.2).

En outre, certaines études ont été faites sur de petites installations individuelles :

- Un banc d'essai horizontal a permis de faire des études de pertes de charge et de cavitation d'assemblages et de diaphragmes.

- Un banc d'essai vertical a servi à mettre en évidence le soulèvement des assemblages à partir d'un certain débit.

- On a étudié également le profil optimal à donner à la culotte de jonction des deux circuits primaires (ces deux circuits se réunissent en une tuyauterie commune qui alimente la base de la cuve de la pile).

- Enfin des essais de vibrations d'assemblages ont été effectués sur modèle représentant un quart de la pile à l'échelle 1/1. Ce modèle a servi par ailleurs à faire des essais relatifs à la mesure de température à la sortie des assemblages, en plaçant le couvercle de la zone haute pression à différentes altitudes. Ce modèle n'était fidèle que dans la partie intéressant les phénomènes mis en cause c'est-à-dire entre le sommier et la sortie du sodium de la cuve.

Etude de l'alimentation en sodium des assemblages

Culotte de jonction.

L'alimentation de la pile se faisant par deux circuits en parallèle, il était nécessaire de prévoir une culotte de jonction. Celle-ci devait être conçue de façon à ce que ses deux branches soient parcourues par des débits égaux ou non. La culotte de jonction étudiée à l'eau est capable d'un fonctionnement hydraulique correct pour des rapports de débits dans les deux branches variant de 1 à 9. Pour cette gamme, on n'observe pas de décollements ni de fluctuations de pression importantes (figure I. 3).

Choix du coude d'entrée.

Ce coude (voir figure I. 2) a été étudié dans l'optique d'obtenir une alimentation régulière des diaphragmes annulaires à l'entrée de la cuve. Après essais et étude des profils de vitesses (figure I. 4) on a été conduit à choisir un coude à deux rayons inégaux (respectivement 600 et 900 mm).

Forme à donner au ballon et au récupérateur.

Pour des raisons de sécurité il est prévu à la base de la cuve de la pile un système capable de recueillir le combustible en cas de fusion du coeur tout en empêchant la formation d'une configuration critique. Ce système, dénommé récupérateur, devait avoir, par rapport à l'enveloppe séparant les zones haute et basse pression, une forme telle que l'écoulement soit peu perturbé au niveau de l'entrée dans le sommier.

Deux critères furent retenus pour déterminer la forme à donner au récupérateur et au ballon (nom donné à l'enveloppe séparant les deux zones de pression) :

- 1° - la veine fluide ne doit pas subir de décollement.
- 2° - la variation de la vitesse moyenne doit être continue et lente.

En fait, étant donnée la forme pointue, nécessaire à l'aval du récupérateur, un décollement se produit nécessairement lors de l'élargissement brusque de la veine fluide. Ce n'est donc que la partie amont du récupérateur qui répond aux exigences prescrites. Les formes retenues ont été déterminées théoriquement par transformations conformes à partir de l'écoulement autour de formes simples (paraboloïde et ellipsoïde) puis légèrement modifiées pour tenir compte d'impératifs de construction.

L'observation visuelle de l'écoulement sur le modèle a montré que le décollement à l'aval du récupérateur était stable et ne donnait pas lieu à des tourbillons entraînés dans le courant principal.

Réglage des débits dans les différentes zones de la pile à l'aide de diaphragmes.

On a voulu obtenir sur Rapsodie un réglage des débits tel que dans chaque zone de chaque région (combustible et fertile) les points chauds aient la même valeur absolue. En fait, ceci ne peut être rigoureusement réalisé car dans les dernières rangées de la couverture, il aurait fallu disposer dans le sommier des diaphragmes dont l'orifice de passage ait un diamètre inférieur à 1 mm. Les risques d'obturation nous ont amenés à proscrire l'utilisation de tels diaphragmes.

Le réglage des débits est obtenu à l'aide :

- de diaphragmes annulaires solidaires du ballon, qui assurent un partage des débits en deux régions, la haute pression alimentant le coeur et la première rangée de couverture (celle-ci pouvant en cas d'extension du coeur devenir une rangée combustible), la basse pression alimentant la couverture radiale et les assemblages réflecteurs constituant la partie mobile des protections.

- de diaphragmes solidaires du sommier, ces diaphragmes étant identiques aux diaphragmes utilisés pour les mesures des débits tels qu'ils sont définis par les normes Afnor .

- de diaphragmes liés aux assemblages fertiles de la zone mixte. On pourra ainsi remplacer dans cette zone des assemblages fertiles par des assemblages combustibles, soit pour atteindre la criticalité si les calculs ont donné des valeurs par défaut, soit en cas d'extension du coeur, et obtenir les débits nécessaires à leur refroidissement.

Les diaphragmes annulaires (solidaires du ballon) ont été essayés sur une plate-forme séparée avant d'être montés sur la maquette à l'échelle 1/1. On a fait varier les trois paramètres suivants :

- le nombre de diaphragmes montés en série.
- la section de passage du jeu annulaire,
- la distance entre deux diaphragmes en série.

pour obtenir la perte de charge désirée pour un débit total donné. Nous donnons à titre d'exemple sur la courbe de la figure I.5 la variation du débit basse pression pour différentes distances séparant les diaphragmes et ce pour un même débit total.

Les essais ont été menés de façon à pouvoir associer à toute répartition de débits entre les deux zones de pression un type de diaphragmes annulaires, dans la mesure où le débit en basse pression représente de 10 à 20 pour cent du débit total.

Des diaphragmes solidaires du sommier ont été étudiés sur un petit banc d'essai et l'on a vérifié que, compte tenu des champs de pression envisagés sur la pile à leur niveau, leur fonctionnement ne conduisait pas à l'obtention de cavitation.

L'étude effectuée sur la maquette à l'échelle 1/1 a permis d'approcher les conditions réelles de répartition de débit dans la pile pour différents débits totaux (de 3 à 700 m³/h de sodium). On a mis ainsi en évidence des distorsions surtout aux faibles débits. Une étude plus poussée est en cours.

La détermination des débits se faisait par mesure au moulinet, le débit total de l'installation étant connu par un Venturi préalablement étalonné.

Ces essais ont aussi mis en évidence l'existence de légères fluctuations de débits entre les assemblages d'une même zone. Par rapport à la valeur moyenne du débit obtenu par assemblage dans une même zone, l'amplitude de ces fluctuations reste toujours inférieure à 5 %, ce qui est parfaitement admissible étant donné que sur la maquette d'essai, les assemblages sont simulés par des systèmes déprimogènes réglables: On peut estimer qu'un mauvais réglage relatif de ces faux assemblages est en partie responsable de ces fluctuations.

Définition de la géométrie optimale des assemblages.

Etude des têtes, pieds, et hauteurs des faisceaux fertiles.

Le principe des assemblages combustibles étant admis (faisceaux superposés formés d'aiguilles munies de fils hélicoïdaux d'espacement, tenus par des grilles liées à deux enveloppes hexagonales, le tout monté dans une gaine hexagonale soudée d'une part au pied, d'autre part à la tête de l'assemblage), il restait à choisir les dimensions des différents éléments des composants.

La hauteur du faisceau combustible résultait de considérations neutroniques. La hauteur de chaque faisceau fertile était liée à la hauteur précédente. Une fois fixée la hauteur du coeur, il fut donc possible de fixer la hauteur hors tout de l'assemblage. On se réserva toutefois une possibilité d'augmenter la hauteur des faisceaux en donnant à la tige de la tête une hauteur surabondante (200 mm) ; de cette façon, on pouvait augmenter éventuellement la hauteur des faisceaux sans changer la hauteur totale de l'assemblage.

Les assemblages de Rapsodie sont tenus par leur propre poids, aussi une limitation du débit s'impose en zone I, (zone centrale non diaphragmée). Des essais effectués à l'eau ont montré que l'effort hydrodynamique :

- est peu influencé par la hauteur des faisceaux fertiles,
- dépend fortement de la section de sortie de la tête de l'assemblage.

De nombreuses mesures ont été effectuées avec trois têtes et deux pieds différents, et avec trois hauteurs du faisceau combustible, chacune d'elles étant associée à une hauteur de couverture telle que la somme des ces hauteurs soit constante.

La détermination du début de soulèvement se faisait par examen de l'apparition d'une fuite au niveau de la portée sphérique du pied. Pour éviter tout frottement parasite, source d'erreur, l'assemblage était guidé à sa partie supérieure par trois petits disques.

A la suite de ces essais, il a paru nécessaire pour éviter tout soulèvement des assemblages :

- d'augmenter la hauteur des faisceaux fertiles
- d'augmenter la section de sortie des têtes.

La hauteur hors tout de l'assemblage ayant été fixée antérieurement, on déduisit à 130 mm la hauteur de la tige de la tête afin de pouvoir augmenter les dimensions des faisceaux fertiles.

Dans le cas le plus défavorable , on disposera ainsi d'une résultante verticale descendante de 7 kg , on évitera donc tout entrainement des assemblages vers le haut. Cette valeur de 7 kg tient compte de ce qui n'a pu être chiffré dans les essais sur un assemblage seul (conditions aux limites différentes pouvant entrainer des vibrations , déformations des assemblages , évolution des états de surface , obstructions partielles de certains canaux , etc...).

Etude de l'écoulement autour des aiguilles de combustible.

L'étude de l'écoulement du fluide dans les assemblages combustibles a été effectuée sur un modèle à échelle 5 et sur un modèle à échelle 1/1.

Des essais de visualisation , des essais à la peinture , des mesures de vitesses par tubes de Pitot , et des mesures de pressions ont permis de conclure que l'écoulement autour des aiguilles était satisfaisant , c'est-à-dire ne présentait aucun décollement ou aucune zone tourbillonnaire.

Des essais ont été également effectués sur des assemblages volontairement imparfaits , schématisant des accidents possibles dans la pile , tels que : interposition d'un corps étranger entre deux aiguilles , obstruction partielle de la grille de fixation des aiguilles , déformation locale d'une aiguille , vrillage d'une aiguille. Les explorations locales de vitesses ont montré que de tels accidents ne se répercutaient que très localement et que leurs conséquences seraient donc aussi minimales qu'il est possible.

Etude de la sortie de sodium de la pile.

Influence du couvercle de la zone haute-pression.

Les essais effectués sur la maquette à l'échelle 1/2 ont montré qu'en l'absence de couvercle , la surface libre dans la cuve était fortement agitée , ce qui pouvait faciliter des entrainements de gaz , d'autant plus que des oscillations en masse prenaient naissance.

La position du couvercle par rapport à la sortie du sodium des assemblages fut déterminée de façon à ne pas introduire des pertes de charge supplémentaires importantes. Une distance de 200 mm fut retenue , compromis satisfaisant entre la force exercée sur le couvercle et son efficacité.

Compte tenu des 130 mm de tige , on dispose d'une hauteur de près de 70 mm pour loger les porte-thermocouples destinés à la mesure des températures à la sortie des assemblages combustibles.

Cote des canalisations de sortie.

Pour éviter l'apparition de vortex d'entonnement , il est nécessaire de conserver au-dessus de l'axe des canalisations de sortie une certaine hauteur de sodium. Les essais effectués sur la maquette à l'échelle 1/2 ont montré que pour des canalisations situées à environ 2,60 m du plan du sommier , il fallait que le niveau libre se situe environ à 3 m au-dessus du sommier (le couvercle étant situé à 200 mm de la sortie des assemblages.)

Etude de la déformation des assemblages.

Ces essais (1) avaient pour but de mesurer les déformations d'une gaine d'assemblage soumise :

- à un gradient thermique seul
- à des réactions en différents points
- à la somme réactions et gradient

Dispositif :

Les mesures ont été faites sur une gaine en acier inoxydable NS 22 S , encastrée à sa base dans un châssis assurant une grande rigidité. Sur ce châssis sont fixés les supports de deux séries de 9 comparateurs qui indiquent les déformations de deux faces opposées de la gaine d'assemblage. On peut ainsi obtenir la déformation moyenne de l'axe de la gaine ainsi que la déformation de sa section droite.

Déformations par gradient thermique.

On a cherché à obtenir des différences de température entre deux faces opposées de la gaine , qui suivent au mieux possible celles prévues dans Rapsodie , c'est-à-dire :

- Gradient transversal nul dans la partie inférieure de la gaine.
- Gradient transversal linéaire dans la partie centrale (partie coeur)
- Gradient transversal maximum dans la partie supérieure.

(1) : Essais effectués par le Conservatoire National des Arts et Métiers.

Ces gradients ont été obtenus à l'aide de deux circulations indépendantes sur les deux faces opposées de l'assemblage (l'une chaude, l'autre froide), une circulation centrale étant assurée dans une vessie en matière plastique qui épouse la forme de la partie restante de l'assemblage. Les gradients recherchés n'ont été obtenus qu'assez imparfaitement; en particulier il a été impossible de supprimer complètement tout gradient transversal dans la partie inférieure de la gaine. D'autre part les différences de pressions introduites dans la gaine, par le gonflage de la vessie plastique déforme la section droite de façon non négligeable. Toutefois, cette cause d'erreur a pu être limitée en mesurant les déformations simultanées des deux faces opposées. Les gradients sur les différentes sections droites de la gaine ont été mesurés par une série de 18 thermocouples reliés à des enregistreurs.

On a trouvé qu'aux erreurs de mesure près les résultats de calculs et les résultats expérimentaux sont identiques, quelle que soit l'importance du gradient. Ces résultats sont représentés sur la figure I. 6.

Déformations dues à des forces (de réactions).

La similitude des essais avec les conditions réelles n'est qu'imparfaite car les essais sont effectués par un assemblage encastré.

Les résultats obtenus sont représentés sur la figure I. 7 (réaction à la tête de l'assemblage) et sur la figure I.8 (effet d'une réaction à la tête de l'assemblage et dans la région du coeur).

Déformations par effet conjugué d'un gradient thermique et de réactions.

Les résultats obtenus sont représentés pour différentes conditions par la figure I. 9.

Etude du refroidissement d'un assemblage combustible pendant le déchargement. (1)

But de l'étude.

Durant les manutentions des assemblages combustibles irradiés le faisceau d'aiguilles fissiles dégage une puissance thermique résiduelle estimée à 2 kW par assemblage (environ 54 W par aiguille). Dès leur extraction de la pile, les aiguilles ne sont plus refroidies par le sodium mais simplement baignées par l'argon de la pile ou de la hotte primaire (manutention primaire) puis immergées dans un bain de plomb pendant le transfert (manutention secondaire).

(1) Essais effectués par la Direction des Etudes et Recherches de l'Electricité de France.

Il s'agissait de déterminer sur un modèle à échelle un, dans lequel les barreaux combustibles sont remplacés par des résistances chauffantes, les caractéristiques du circuit de refroidissement pour que le point le plus chaud des gaines d'aiguilles ne dépasse pas une température maximale choisie. Nous avons fixé pour cette température, deux valeurs, 450°C et 750°C, qui nous ont paru raisonnables compte tenu des différents types d'assemblages susceptibles d'être placés en pile. Nous avons alors procédé aux essais suivants :

essai a : Recherche du temps au bout duquel les gaines d'aiguilles atteindront 450°C pour 2 cas :

L'assemblage est refroidi par convection naturelle dans l'air à 20°C.

L'assemblage est disposé dans un conduit simulant le canal de manutention donc dans l'argon à 150°C.

essai b : Détermination du débit d'argon nécessaire pour ne pas dépasser 450°C sur les gaines d'aiguilles combustibles.

essai c : même essai que b pour 750°C

essai d : Etude des conditions d'immersion de l'assemblage dans un bain de plomb et conditions de refroidissement de l'assemblage.

Assemblage expérimental (figure I.10)

L'assemblage expérimental a les mêmes caractéristiques géométriques que l'assemblage combustible réel. Les aiguilles fertiles des couvertures supérieure et inférieure sont des barreaux en acier inoxydable et les aiguilles combustibles sont remplacées par un jeu de 37 aiguilles en acier inoxydable contenant une résistance chauffante en fil nichrome isolé par des manchons en stéatite, (longueur chauffante : 400 mm) Les liaisons électriques à la sortie des aiguilles occupent un minimum de place, de sorte que l'écoulement n'est pratiquement pas perturbé.

La température de paroi des aiguilles est mesurée par des thermocouples chromel-alumel placés à l'intérieur de gaines protectrices en acier inoxydable de 0,85 mm de diamètre, qui occupent la place exacte des fils hélicoïdaux des assemblages réels. On dispose ainsi de 37 thermocouples dont les soudures sont réparties à différentes altitudes le long des aiguilles.

Circuit expérimental pour essais à l'argon (figure I. 11)

L'assemblage expérimental est placé à l'intérieur d'un conduit vertical de 80 mm de diamètre et de 4900 mm de hauteur. Un ventilateur centrifuge peut assurer un débit d'argon de 25 l/s. à 150 ° C. La température du gaz entrant dans l'assemblage est réglée au moyen d'un réchauffeur situé en amont, et d'un réfrigérant situé en aval. Une vanne permet d'ajuster le débit. Des prises de pression et des thermocouples sont placés à l'entrée et à la sortie du gaz de l'assemblage.

Dispositif pour essais d'immersion dans le plomb.

Le dispositif expérimental est constitué essentiellement d'une cuve (\varnothing intérieur 155 mm, hauteur 1200 mm) contenant du plomb dont la fusion est obtenue par des rampes à gaz extérieures, d'un mécanisme assurant la descente de l'assemblage dans le bain de plomb, et des appareils de mesure des températures et de la puissance dégagée par les aiguilles chauffantes.

L'assemblage d'essai est analogue à celui décrit au par. 2 avec toutefois quelques modifications : les aiguilles constituant la couverture supérieure ont été enlevées et les aiguilles chauffantes ont été prolongées de 70 mm de façon à éviter toute introduction de plomb sur les résistances ; toutes les sorties électriques sont faites à la partie supérieure des aiguilles au-dessus du niveau de plomb.

Résultats.

Essais a :

L'évolution des températures ^{est} représentée par la figure I. 12 (convection naturelle dans l'air à 20° C) et par la figure I. 13 (convection naturelle avec tirage dans l'argon à 150° C) en fonction de la puissance dégagée par les aiguilles .

Le refroidissement de l'assemblage par convection naturelle de l'argon ne semble pas pouvoir être suffisant pendant le déchargement d'un assemblage de la pile. Les essais montrent en effet que les aiguilles atteignent 450° C au bout de 3 minutes environ. De plus, une extrapolation des premiers résultats permet de penser que les 750° C seraient atteints au bout de 7 minutes environ. Même si ce temps peut paraître suffisant pour extraire l'assemblage de la pile, il est indispensable de conserver le refroidissement pour le cas où un mauvais fonctionnement du système de déchargement amènerait un arrêt prolongé en cours de manoeuvre.

Essais b -

Les essais ont été effectués d'abord sur le faisceau d'aiguilles chauffantes seul, puis sur l'assemblage complet (figure I.14).

On a déterminé expérimentalement que la circulation forcée d'argon nécessaire pour évacuer une puissance de 2 kW (55 W par aiguille) sans dépasser 450°C sur les gaines des aiguilles est la suivante :

- température et pression à l'entrée de l'assemblage : 150°C - 1,25 kg/cm²
- débit masse d'argon : 17,45 g/s
- Δp dans l'assemblage : 96 g/cm².

Essais c -

La figure I. 15 indique la température de surface d'aiguilles au point le plus chaud en fonction du débit d'argon, pour différentes puissances dégagées par aiguille.

Il apparaît que pour une puissance dégagée égale à 2 kW (55 W par aiguille), la température de 750°C n'est pas dépassée pour un débit d'argon égal à 7,5 g/s. La perte de charge à travers l'assemblage est alors de 43 g/cm².

Essais d -

Le plomb est d'abord fondu dans la cuve puis maintenu aux environs de 400°C. L'ensemble de l'assemblage est préchauffé à 150°C et les résistances de chauffage sont mises sous tension. Lorsque la température de 450°C est atteinte sur les aiguilles on descend l'assemblage dans le bain. La figure I. 16 indique l'évolution des températures dans l'assemblage après immersion. On voit que la température de 450°C n'est jamais dépassée pour la puissance de 2 kW.

L'introduction de l'assemblage dans le plomb n'a pas présenté de difficulté et on a constaté que le plomb remonte facilement à l'intérieur des faisceaux d'aiguilles à condition que la température de la partie inférieure de l'assemblage soit au moins de 150°C et que le bain de plomb soit à 400°C. Le seul défaut constaté est dû au retrait important du plomb au cours de sa solidification : on a observé sur le dispositif expérimental la présence d'une crevasse centrale qui découvrait la partie supérieure des aiguilles centrales. Sur l'assemblage réel cet inconvénient risque d'être encore plus marqué du fait que la solidification du plomb à l'intérieur de l'assemblage pourra se produire dans le faisceau fertile supérieur alors que la région des aiguilles combustibles sera encore liquide. Une solidification partielle de la partie centrale pourrait entraîner la présence de poches de vide risquant de provoquer des points chauds.

Nous allons reprendre une série d'essais avec un nouveau type d'assemblage chauffant permettant l'immersion complète. Nous essaierons d'autre part de substituer au plomb un alliage plomb-antimoine (9 % d'antimoine) dont le point de fusion est de l'ordre de 260°C et le coefficient de dilatation un peu plus faible que celui du plomb. Nous utiliserons pour ces essais un dispositif de chauffage par induction semblable à celui prévu pour le puits de déchargement de la pile.

Etude des joints métalliques liquéfiables

L'étanchéité entre l'atmosphère intérieure de la pile (argon) et l'atmosphère extérieure est assurée, par des joints liquéfiables (étain bismuth) représentés schématiquement sur les figures I. 17 et I. 18. L'alliage métallique des joints est solide quand la pile fonctionne ; on le fond quand on veut faire une manoeuvre nécessitant la rotation des bouchons.

On a cherché expérimentalement un alliage et une méthode de coulée telle que l'étanchéité soit absolue quand l'alliage est solide. Il faut pour cela que l'alliage ne donne lieu à aucune fissuration au moment de la solidification et qu'il présente une bonne adhérence sur les parois une fois solidifié. Il faut d'autre part que sa température de fusion ne soit pas trop élevée.

Des essais systématiques ont été entrepris sur de petits échantillons, puis sur une maquette à l'échelle 1/10 du joint du réacteur (300 mm de diamètre) enfin sur une maquette à l'échelle 1 (3 m de diamètre) (1).

L'observation visuelle sur des coulées d'échantillons a montré que les métaux purs (Pb, Sn) n'étaient pas satisfaisants, mais que par contre les alliages binaires, tertiaires ou quaternaires contenant un assez fort pourcentage de bismuth semblaient convenir. Des essais plus systématiques ont été alors entrepris sur les alliages Bi - Sn (57 % Bi, 43 % Sn et 59 % Bi, 41 % Sn) ainsi que sur des alliages Bi-Pb-Sn et Bi-Pb-Sn-Cd.

Ces essais ont montré que :

- Parmi les alliages étudiés, l'alliage Bi 57-Sn 43 donne les lingots les plus compacts, adhérents le mieux aux parois.
- Le refroidissement lent à l'air libre donne les meilleurs résultats.
- Pour obtenir une bonne adhérence il faut effectuer le traitement de surface suivant :
 - décapage à 60°C par une solution $\text{FH}(2\%)$, $\text{NO}_3\text{H}(10\%)$ et eau (88 %)
 - rinçage à l'eau
 - décapage à froid par une solution de $\text{Cl}_2\text{Zn}(1/3)$, $\text{ClH}(1/3)$ et eau (1/3).

(1) Ces essais ont été exécutés par les Chantiers de l'Atlantique

A la suite de ces premiers essais l'eutectique Bi-Sn (57,9/42,1) a été retenu et a désormais été le seul utilisé.

On a alors effectué, avec cet eutectique, des essais consistant à fondre l'alliage dans un bac, puis à y introduire une pièce en acier ayant subi différents traitements de surface. On contrôlait ensuite l'étanchéité au spectromètre à hélium, et on évaluait l'adhérence par arrachage de la pièce.

Ces essais ont montré que, une fois l'adhérence et l'étanchéité obtenues, celles-ci restent bonnes après rotation de la pièce dans le bain. Par contre, si la pièce est sortie au contact de l'air même pendant un temps très court, il est impossible d'obtenir de nouveau l'adhérence. On a trouvé également que l'adhérence est meilleure si :

- l'eutectique est coulé à 230° sur les pièces froides et encore humides après décapage.
- la pièce a été précédemment préparée par un étamage utilisant l'eutectique choisie.

Des essais ont été alors poursuivis sur deux maquettes de 300 mm de diamètre (figure I. 19), puis sur une maquette de 3 m de diamètre.

La maquette de 3 m de diamètre représente à l'échelle 1 le joint qui sera installé sur la pile Rapsodie (figure I. 20). Une languette circulaire solidaire d'une couronne tournante et à l'intérieure de laquelle pénètrent des résistances chauffantes, longe dans une gouttière circulaire dans laquelle est coulé l'alliage fusible. Une couronne extérieure en fonte porte le chemin de roulement. Elle est traversée par deux piquages pour prise de vide utilisés pour les tests d'étanchéité. Le chauffage est assuré par 40 résistances électriques de puissance totale 36 kW (soit 3,3 kW par mètre linéaire de joint).

La méthode de remplissage du joint qui a été trouvée la plus satisfaisante est la suivante : le métal d'apport est constitué de baguettes d'eutectique bismuth-étain. Un étamage préalable est fait entre 340 et 400°C avec flux, la couche d'eutectique déposée ayant une épaisseur moyenne de 0,5 à 0,7 mm. Le nombre de points de coulée a été porté à 48 avec préchauffage à 100°C.

L'épreuve d'étanchéité après la solidification du bain a été concluante. De nombreuses fusions et rotations ne détériorent pas cette étanchéité.

Etude d'ensemble du bloc pile

Une maquette en vraie grandeur du bloc pile (cuves d'étanchéité et de sécurité, bouchons, assemblages, etc...) est en cours de réalisation. Cette maquette doit permettre :

- a) par sa réalisation à l'échelle 1/1 et avec les mêmes matériaux que ceux de la pile future, de donner une expérience complète pour la construction de la pile : procédés d'usinage et techniques de soudure, réalisation de pièces à tolérances très serrées, traitement de surfaces, revêtements contre le grippage, construction et montage dans des conditions de propreté nucléaire, etc...
- b) de vérifier les calculs ou de se substituer à eux dans le cas où ils se révèlent trop difficiles à formuler : contraintes thermiques sur des pièces de géométrie complexe, circulation en convection naturelle à l'intérieur de la cuve, vibrations, etc...
- c) de vérifier la tenue de cet ensemble après un fonctionnement
 - en régime établi avec un débit de sodium égal à celui de la pile pour une marche à 20 MW (720 m³/h).
 - en régimes transitoires avec la création de chocs thermiques semblables à ceux pouvant exister sur la pile future.

Afin de pouvoir étudier tous ces points sur la maquette du bloc-pile, deux circuits y ont été associés pour permettre sa mise en sodium d'une part (circuit A), et la circulation de celui-ci dans des conditions reproduisant celles du réacteur futur d'autre part (circuit C).

Maquette du bloc-pile

La maquette du bloc-pile est constituée de cuves (d'étanchéité et de sécurité) et de dispositifs de fermetures supérieures (bouchons) identiques à ceux prévus pour la pile. Les protections latérales (graphite et béton) ne sont pas mises en place, mais il sera éventuellement possible de mettre le mur de graphite autour de la pile. Les tuyauteries de sodium s'arrêtent à environ 2 m de la cuve de sécurité (figures I.21, I.22 et I.23). Pour reproduire la chaleur créée dans les bouchons de la pile, 420 résistances électriques sont noyées dans le graphite des bouchons de la maquette. Elles peuvent fournir au total 250 kW.

La maquette est alimentée en sodium par deux circuits en parallèle (A et C). Le tout est entouré d'une charpente dont la fonction principale est de supporter les chemins de roulement de la hotte primaire.

A l'intérieur de la cuve, afin de respecter l'écoulement du sodium, sont placés des assemblages de conception identique à ceux du réacteur. Ils contiennent de l'uranium naturel à la place du combustible.

On peut d'autre part, remplacer les assemblages constituant le coeur par un dispositif électrique appelé coeur chauffant dissipant une puissance de 1 MW. Ce coeur chauffant est formé d'assemblages munis de résistances électriques à l'intérieur des aiguilles, et conçus pour respecter les pertes de charge des assemblages normaux. Deux solutions sont à l'étude dont une est représentée sur la figure I.24.

Des bouchons représentent schématiquement les six barres de contrôle afin de reproduire le mieux possible les gradients thermiques et leur apport calorifique dans les bouchons de la cuve. Par contre, le couvercle prévu au-dessus du coeur de la pile y sera installé.

Enfin, tout le long de la cuve d'étanchéité sont disposés 500 thermocouples environ. Des jauges de contraintes seront également installées, si des essais préalables en cours se révèlent satisfaisants.

Deux systèmes enregistreurs sont associés à ces thermocouples et ces jauges de contraintes :

- un système d'enregistrement lent, de type classique (1600 voies de mesure, 18 points par seconde),
- un système d'enregistrement rapide (200 voies de mesure, 1000 points par seconde).

Circuit A (circuit d'alimentation de la cuve)

Son rôle est d'alimenter la cuve en sodium à 550° C correctement purifié.

Il comporte essentiellement un réchauffeur électrique (240 kW) un ensemble de purification (piège froid et indicateur de bouchage) et une pompe électromagnétique à courant alternatif monophasé (9 m³/h, 1,5 kg/cm²). Les tuyauteries sont de diamètres 20 et 40 mm. Elles sont préchauffées électriquement.

Circuit C (circuit de chocs thermiques)

Le schéma de principe de ce circuit est indiqué sur la figure I.25

Monté en parallèle avec le circuit A, il se compose :

- d'une pompe mécanique P_{1m} à sodium de 720 m³/h,
- d'une pompe électromagnétique P_{em} ,
- d'un échangeur E_1 de 1 MW
- d'un réchauffeur C_1 de 240 kW
- d'un réservoir d'alimentation R_2 de 20 m³
- d'un réservoir de stockage R_1 , commun au circuit A, de 36 m³.

Les tuyauteries de 200 et 300 mm de diamètre sont préchauffées à l'aide de résistances électriques (de même que R_2). Trois vannes à commande pneumatique (V_B , V_D , V_E) sont à temps d'ouverture et de fermeture réglables. Débitmètres, thermocouples, indicateurs de niveaux, etc... permettent de contrôler le fonctionnement de l'installation.

Pour réaliser un choc thermique dans la cuve, on la porte à une température T_1 , en faisant circuler le sodium qu'elle contient dans un réchauffeur ou un échangeur (selon sa température initiale). A l'instant 0, on envoie dans la cuve, à l'aide de la pompe P_m , et par l'intermédiaire d'une vanne à ouverture rapide, une certaine masse de sodium à une température T_2 , prélevée dans le réservoir R_2 .

Expériences envisagées sur le bloc pile

Les principales expérimentations qui seront effectuées sur cette maquette sont rapidement passées en revue dans ce qui suit :

Etude de préchauffage :

On étudiera le temps nécessaire pour porter l'ensemble à 150° C par circulation d'azote chaud dans la double enveloppe, ainsi que la répartition des températures au cours de l'opération (dans le but d'éviter des gradients trop élevés).

Etude du refroidissement :

Le système de préchauffage est conçu pour pouvoir éventuellement servir à extraire la chaleur dégagée après une chute de barres (environ 300 kW), si la circulation du sodium était totalement interrompue par un grave accident sur l'installation de refroidissement. Ceci suppose des mouvements adéquats de convection naturelle à l'intérieur de la cuve. Une vérification expérimentale s'impose. C'est dans ce but qu'est réalisé le coeur chauffant conçu pour reproduire la perte de charge des assemblages en dégageant une puissance qui peut atteindre jusqu'à 1 MW.

Refroidissement des bouchons :

Le dégagement de chaleur des bouchons, évalué à 100 kW, s'effectue dans les 30 premiers centimètres des couches inférieures. Pour ne pas induire dans la cuve de contraintes prohibitives, il faut que l'évacuation de cette chaleur se fasse en y maintenant un gradient de température le plus faible possible. Nous vérifierons si la conception et l'exécution des bouchons sont corrects, en simulant le dégagement de chaleur de la pile (dû aux neutrons et aux γ) par des résistances électriques. Des mesures de température seront effectuées sur les tôles de la cuve, des bouchons et à l'intérieur de ceux-ci. Le refroidissement des bouchons doit être assuré par une soufflante à air de 6500 m³/h alimentant 1000 serpentins noyés dans le graphite des bouchons.

Etudes du régime permanent :

Celles-ci comportent les mesures de températures (et si possible de contraintes) et les mesures hydrauliques correspondant au régime normal de fonctionnement de la pile. Pour simuler ce régime, nous disposons :

- à puissance nulle, du circuit A (10 m³/h, montée en température jusqu'à 550° C)
- de zéro à 1 MW, du circuit C et du coeur chauffant.

Il sera possible de contrôler si les gradients thermiques obtenus sur la maquette sont semblables à ceux calculés et de mesurer les contraintes correspondantes (ou de les calculer de façon plus sûre). Des débitmètres mis en place sur des assemblages spéciaux permettront de contrôler les débits du sodium dans chaque zone.

Etudes des régimes transitoires :

Celles-ci comportent les mesures de températures (et de contraintes) en régimes transitoires de la pile : montée en puissance, chute de barres lente ou rapide, incidents ou accidents que l'on peut prévoir. Tous ces régimes peuvent être simulés par le circuit C. L'appareil enregistreur

rapide permettra d'analyser les variations de températures (et de contraintes) qui en résultent.

Enfin, on vérifiera la tenue des différentes pièces ou ensembles après des cyclages thermiques ou après une circulation de sodium au débit maximal (720 m³/h) : usure des pièces, déformations, ruptures, tenue de certains revêtements, etc...

Mise au point du système de chargement et déchargement :

La hotte primaire de manutention du combustible de Rapsodie est dès à présent en construction. Les manoeuvres de chargement et déchargement seront essayées sur les assemblages de la maquette, ce qui doit permettre d'étudier en détail ces opérations délicates et de modifier si besoin est, les dispositifs mis en cause (pince d'extraction des assemblages, têtes des assemblages, jeux, supportage des assemblages, etc...)

Essais de mécanismes

Installation d'essai au sodium.

Elle se compose de cinq réservoirs d'expérimentation de 600 mm de diamètre et de 5 mètres de hauteur, permettant de contenir une colonne de sodium de 4,5 mètres. Un circuit associé, appelé circuit B alimente ces cinq réservoirs en sodium purifié, au moyen d'une pompe électromagnétique. Ce circuit est actuellement prêt à fonctionner.

Chaque réservoir d'expérimentation peut être isolé et un système de cannes électriques chauffantes permet de porter la température du sodium qu'il contient jusqu'à 550° C.

Cette installation permettra la mise au point d'organes mécaniques tels que barres de contrôle, pinces du dispositif de déchargement du combustible. Des essais prolongés de ces appareils pourront y être effectués dans des conditions identiques aux conditions d'utilisation.

En ce qui concerne les barres de contrôle, deux points ont déjà fait l'objet d'études préalables. Ce sont :

le système de freinage en fin de course pour une chute urgente, et les soufflets d'étanchéité qui se raccordant à la tige de commande de la pince d'une part et à un fourreau fixe d'autre part, doivent pouvoir subir de grands allongements.

Machine d'essais de freinage en fin de course

Cette machine a été construite dans le but de vérifier la fidélité d'un système de freinage type poinçon-machoire, de rechercher un matériau présentant de bonnes qualités frottantes et d'usure, et de déterminer des profils limitant au maximum l'énergie absorbée par choc au profit de l'énergie absorbée par frottement. Elle se compose d'un bâti permettant le coulissement vertical d'une masse chutant à des hauteurs variables et freinée en fin de cours par un poinçon s'introduisant entre deux mâchoires dont l'effort de serrage peut être réglé (figures I. 26 et I. 27).

Chaque essai comporte une mesure des efforts de frottement ainsi qu'une série d'examens tels que :

- relevé des dimensions, pesée, photographies de l'état de surface, mesure de rugosité et de dureté.

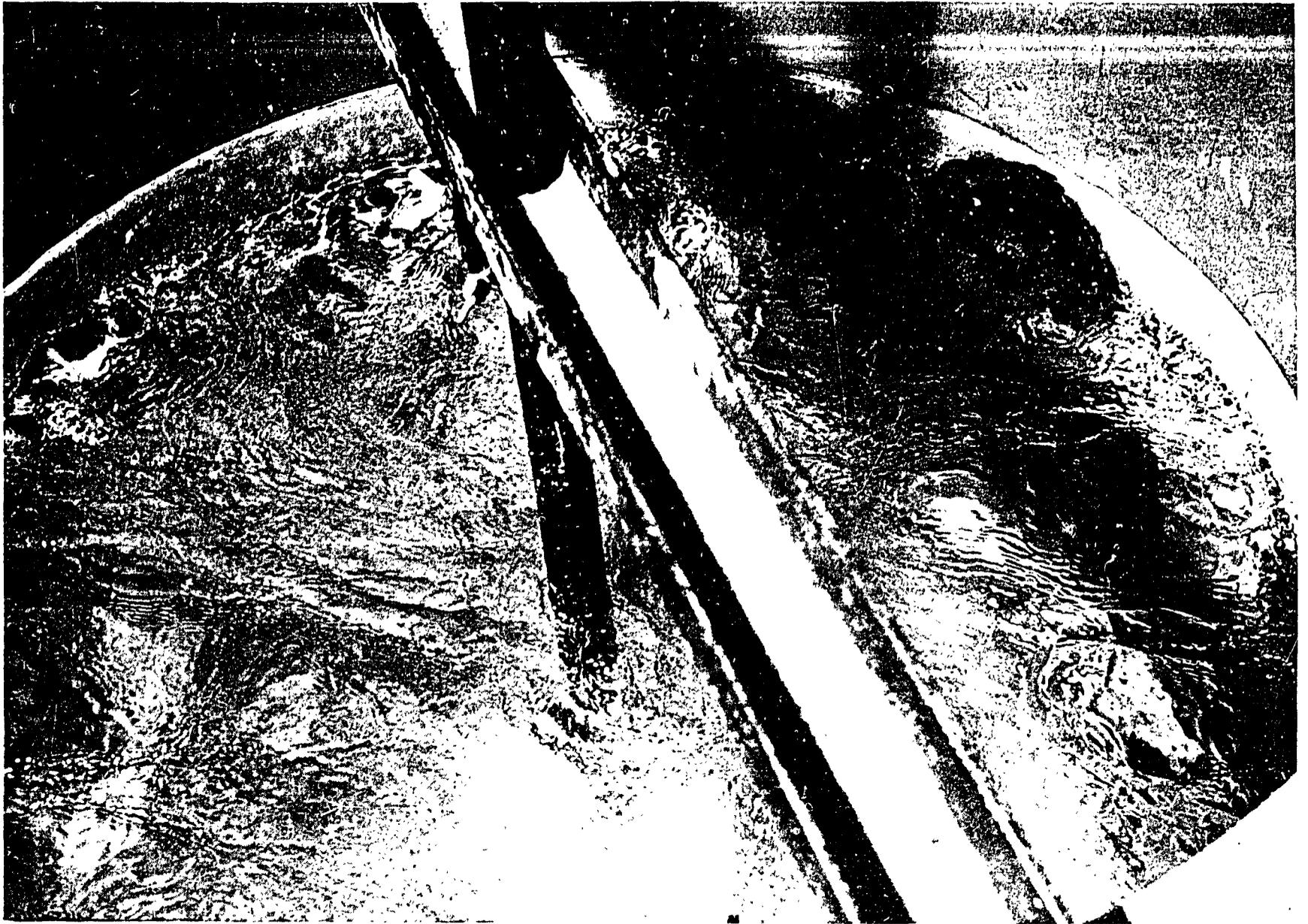
Une première série d'essais (2000 chutes par essai) a été effectuée sur 10 jeux de poinçon-machoire, de matériaux différents ou traités différemment. Les résultats sont en cours de dépouillement.

Machine d'essais à chaud de soufflet d'étanchéité à grand allongement

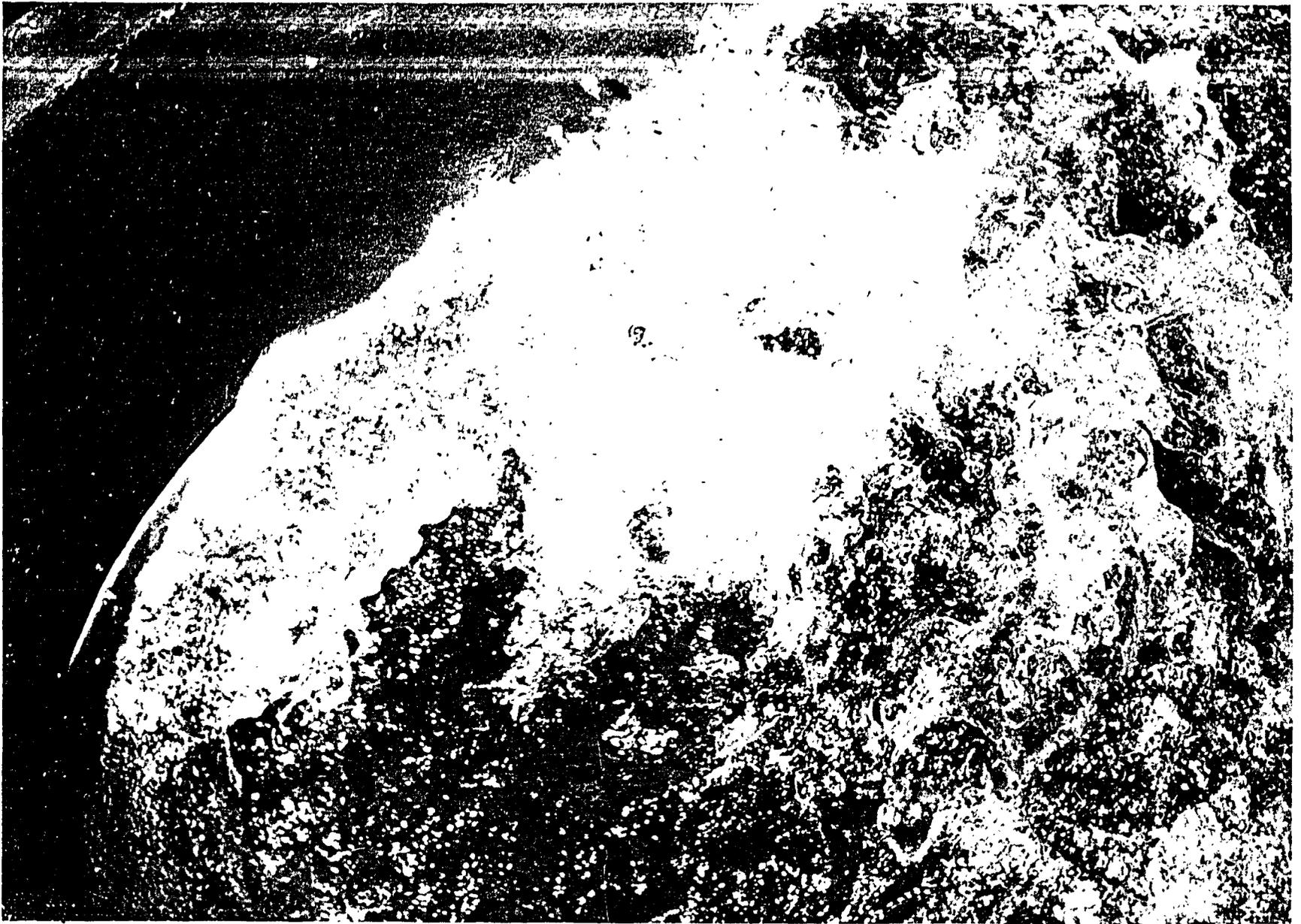
Cette machine permet de reproduire le fonctionnement en pilotage ou en chute rapide des mécanismes de barre de contrôle et de tester ainsi les soufflets destinés à les équiper.

Le soufflet est placé dans une enceinte, dans laquelle on peut introduire l'hélium pour tester l'étanchéité du soufflet. Quatre rampes à propane permettent de porter la température du soufflet jusqu'à 550° C. Une virole calorifugée entoure l'ensemble. Le débit des rampes à propane peut être réglé pour obtenir sur le soufflet le profil de température désiré.

Une tige de commande et un système pignon-crémaillère donnent au soufflet des mouvements identiques à ceux du fonctionnement en pilotage. La chute rapide est obtenue par déverrouillage de la tige de commande liée au soufflet, la chute a lieu sous l'effet de ressorts accélérateurs, l'arrêt en fin de course se fait par dash-pot à huile. Ces différents cycles peuvent automatiquement être faits. La vitesse de chute rapide est réglable au moyen de ressorts accélérateurs et enregistrée.



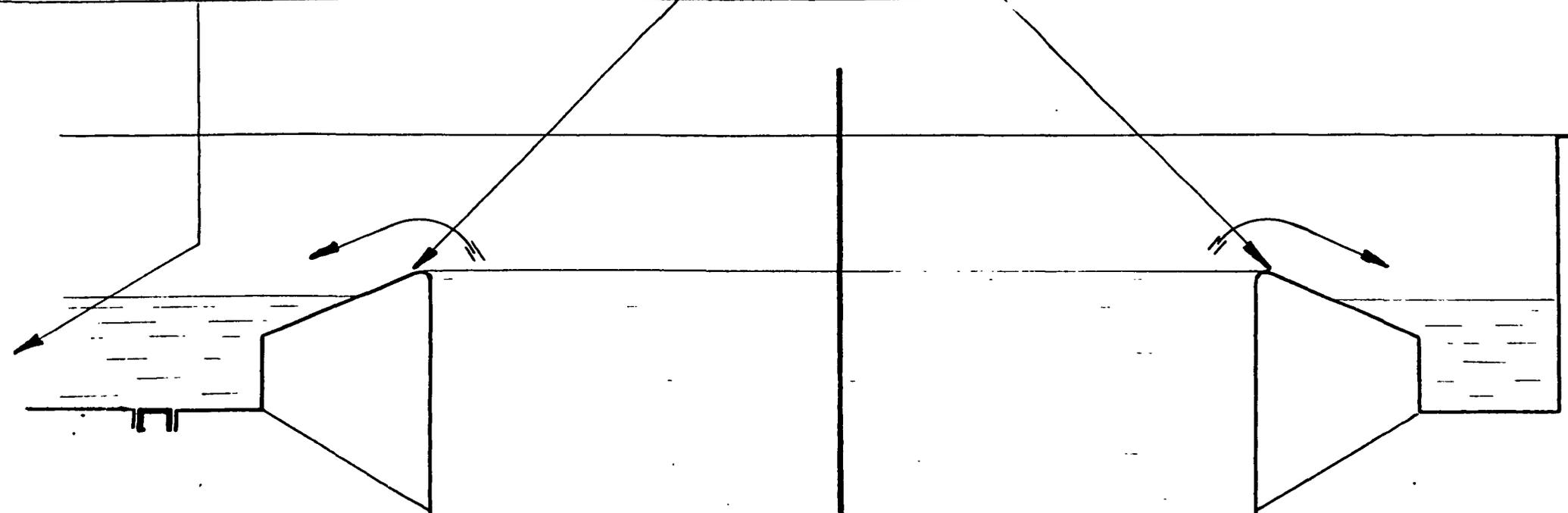
Niveau libre dans la cuve avec couvercle.



Niveau libre dans la cuve sans couvercle.

Écoulement du déversoir

Déversoir circulaire

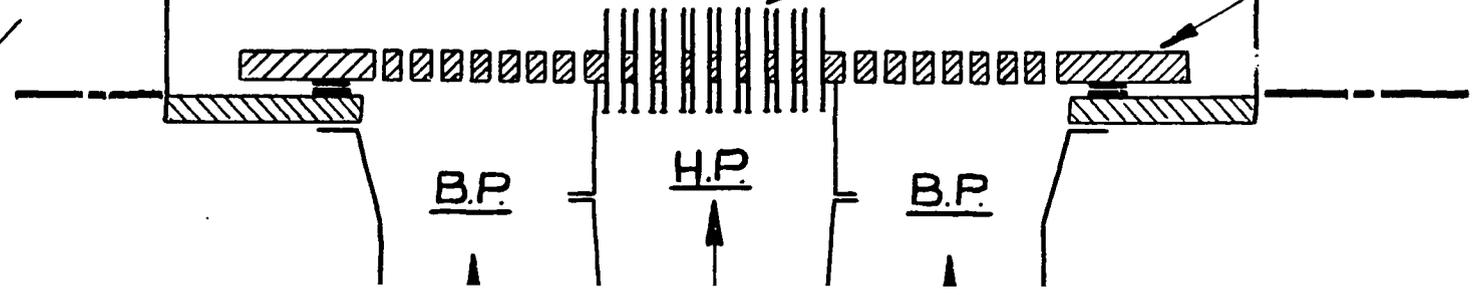


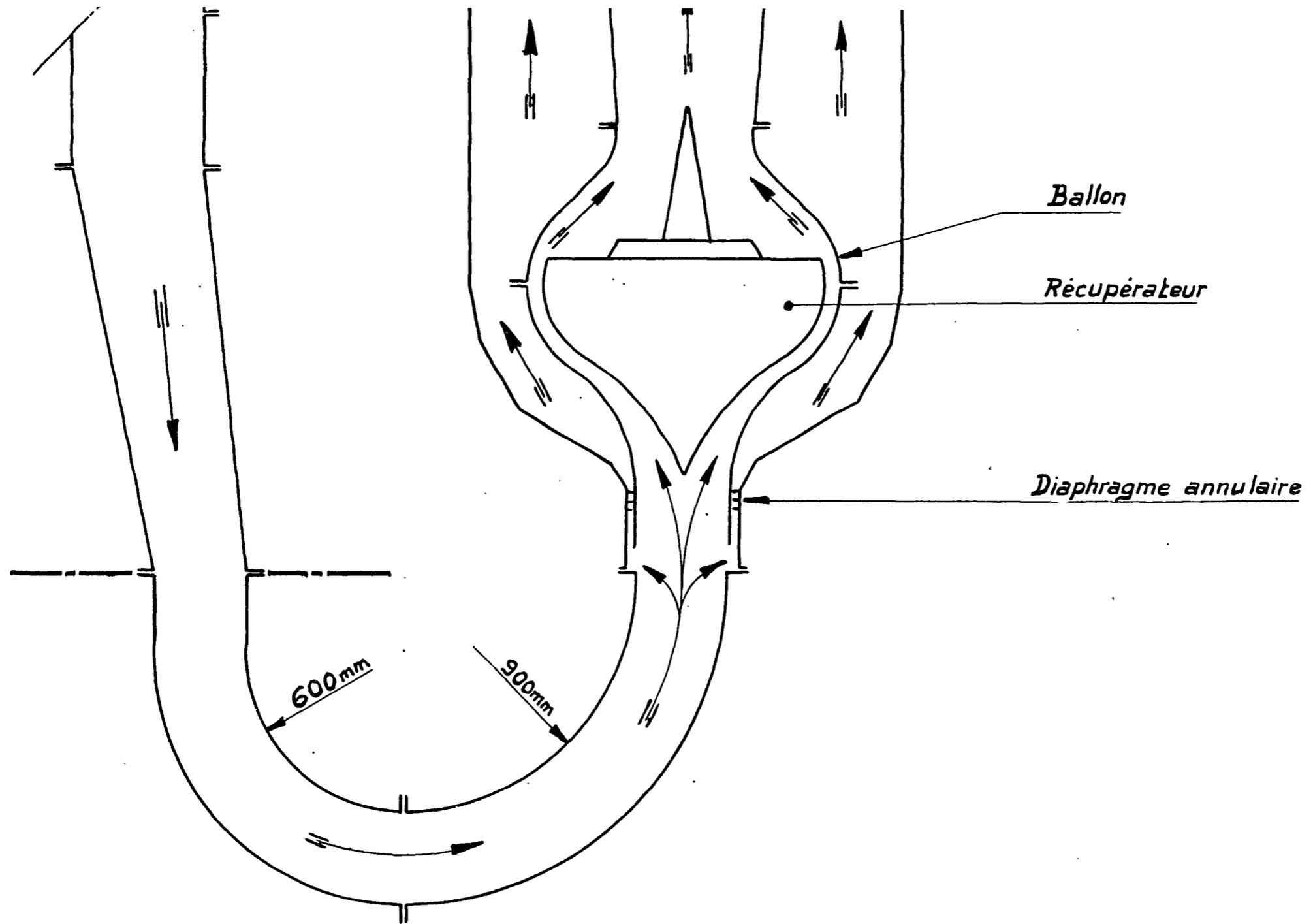
Couvercle

Diaphragmes simulant les assemblages

Sommier

Arrivée du fluide





Maquette Hydraulique
à l'échelle 1/1

FIG. I. 1

SCHEMA MONTRANT les SECTIONS de MESURES

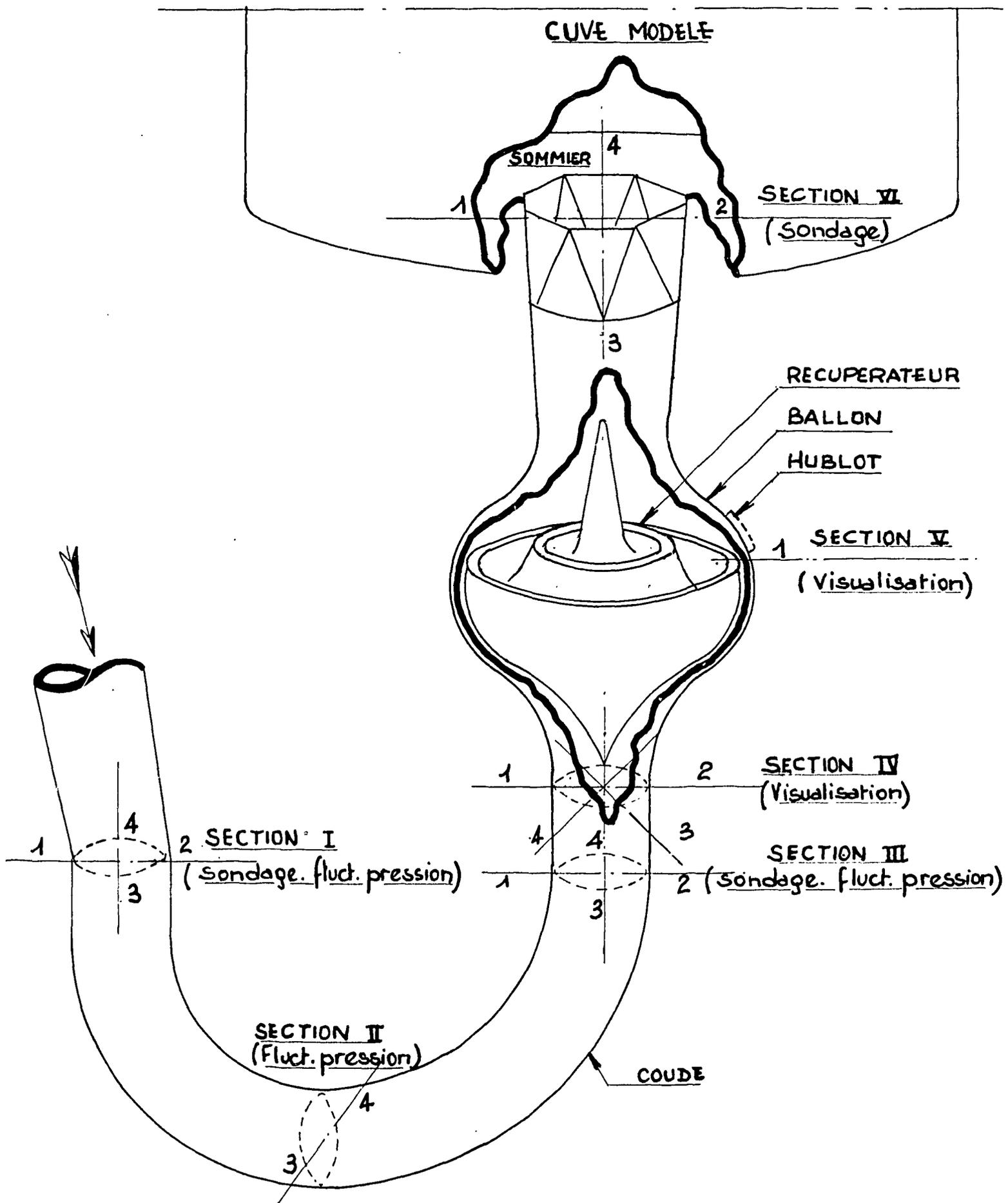


Figure - I 2

ESSAIS DE LA CULOTTE DE JONCTION

MESURES DES VITESSES
A L'AVAL DE LA CULOTTE

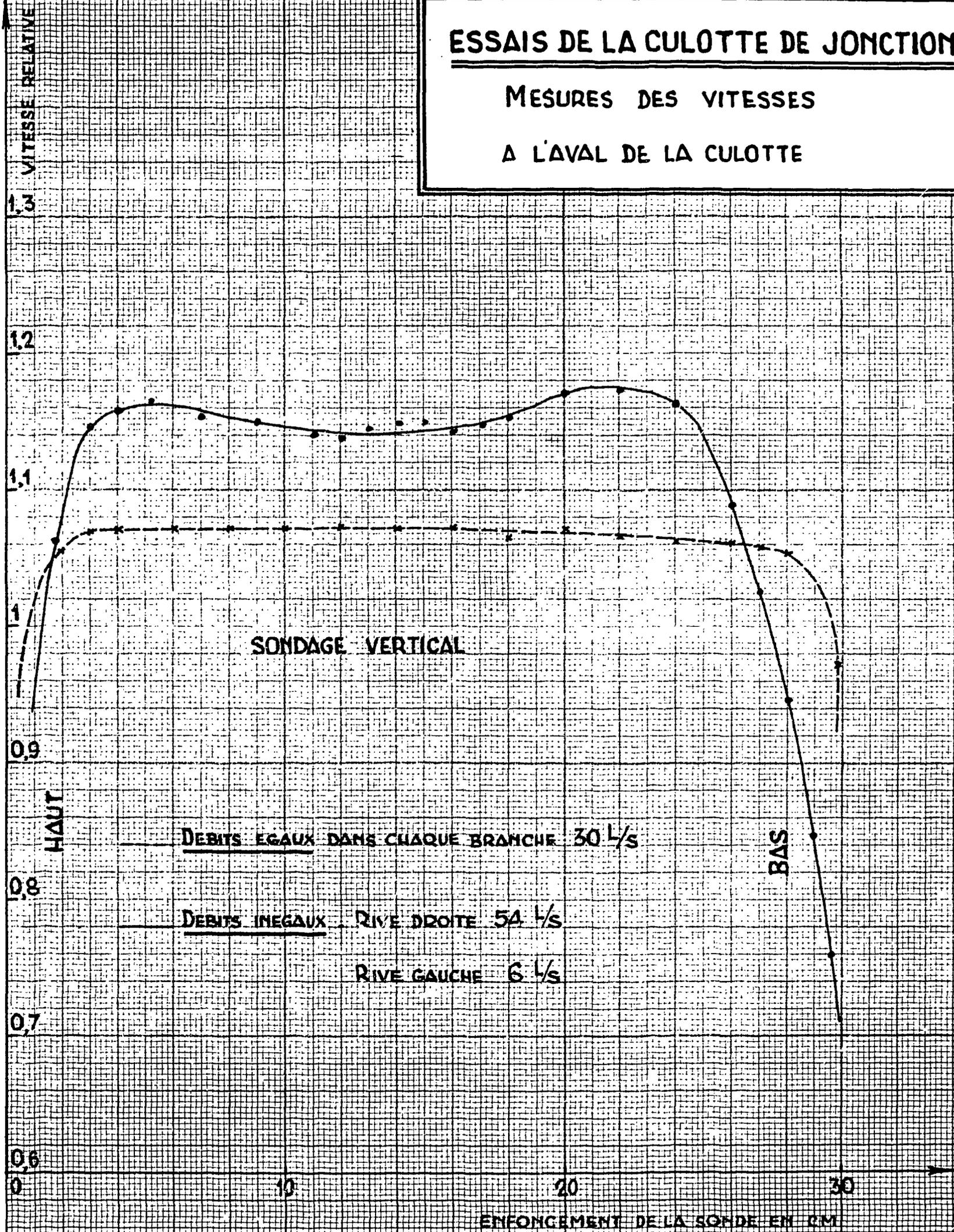


Figure 13

CARTE DES VITESSES RELATIVES

A LA SORTIE DU COUDE - SECTION N° III

$Q = 168,32 \text{ l/s}$

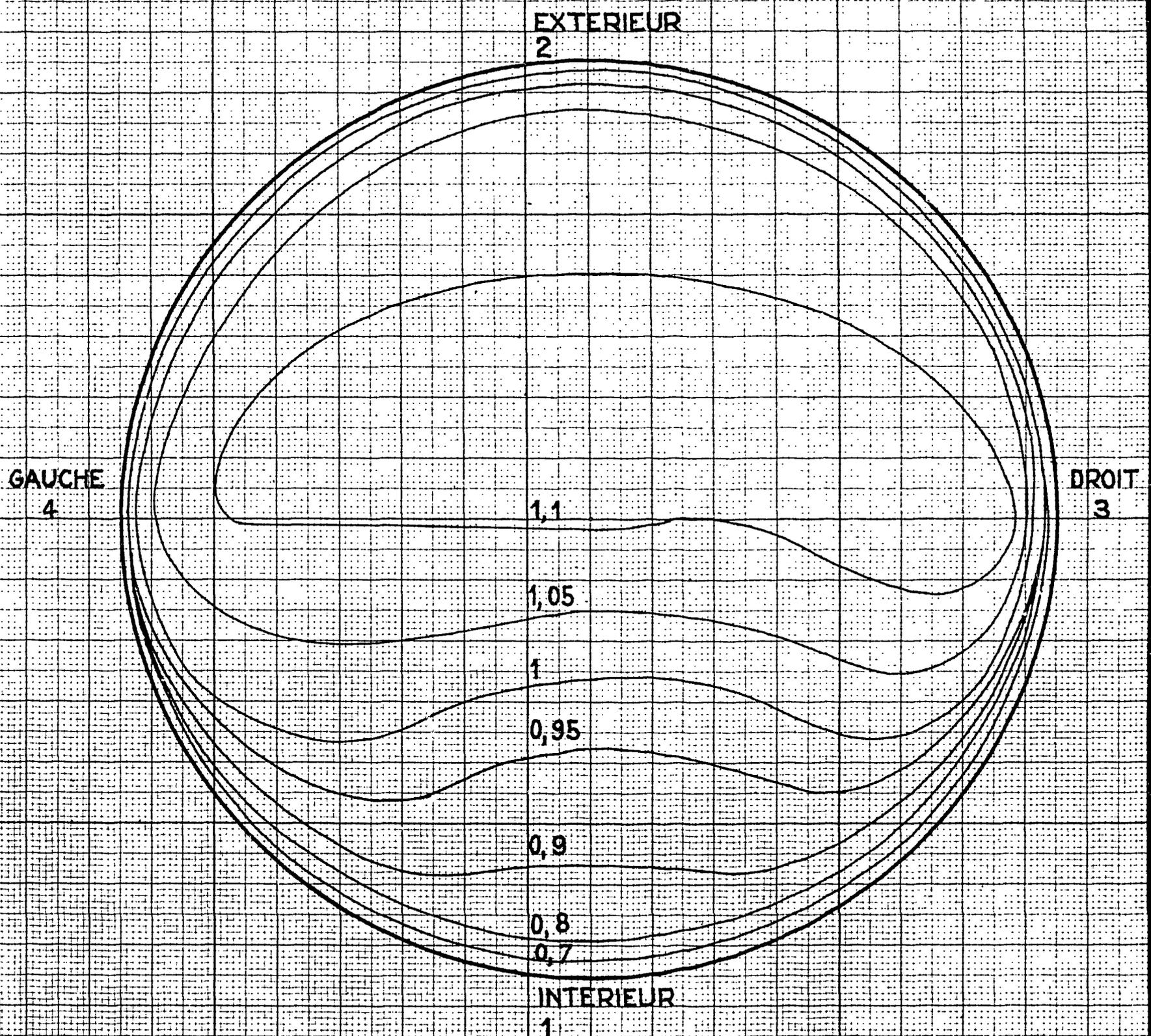


Figure I.4

Schéma de principe des Diaphragmes annulaires

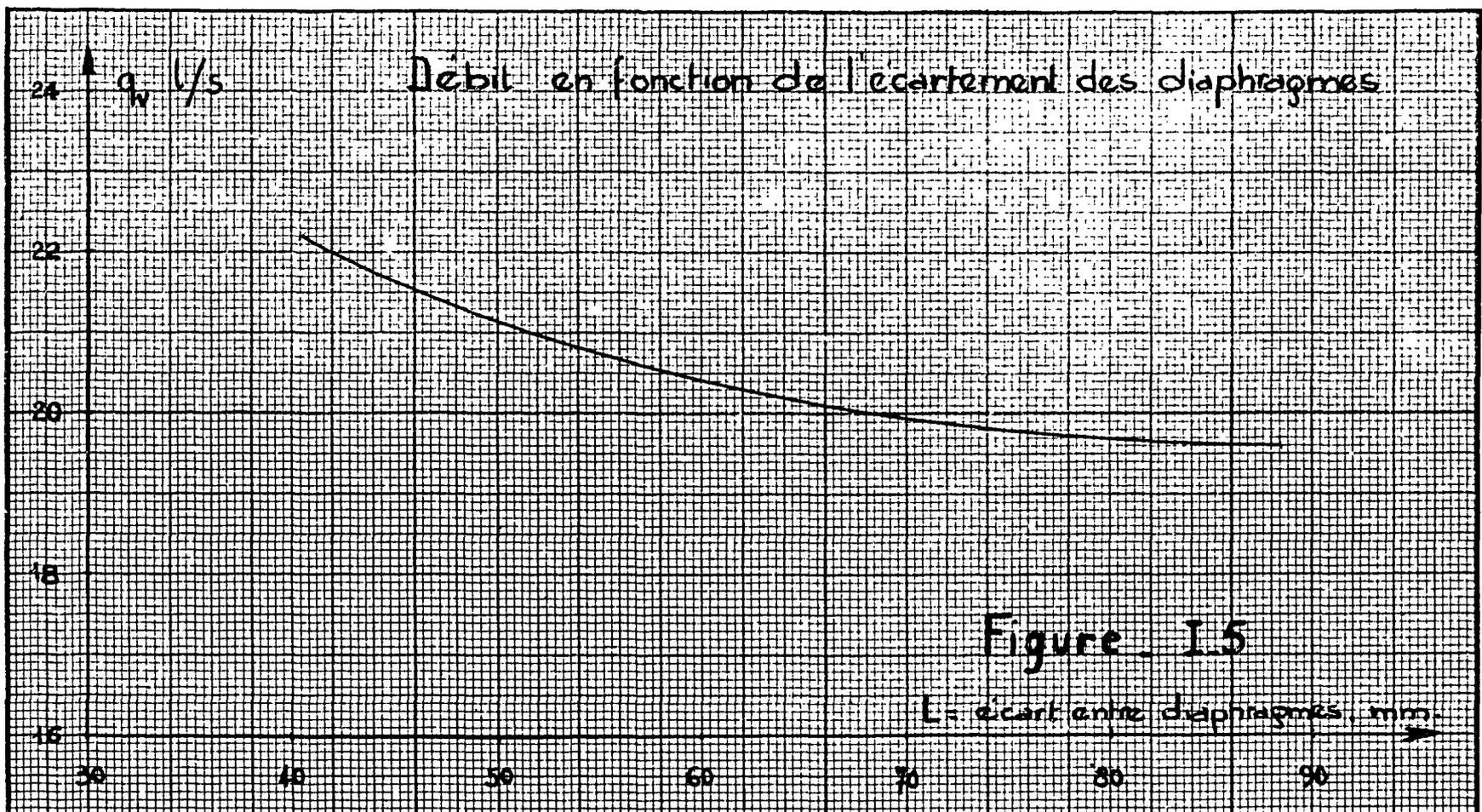
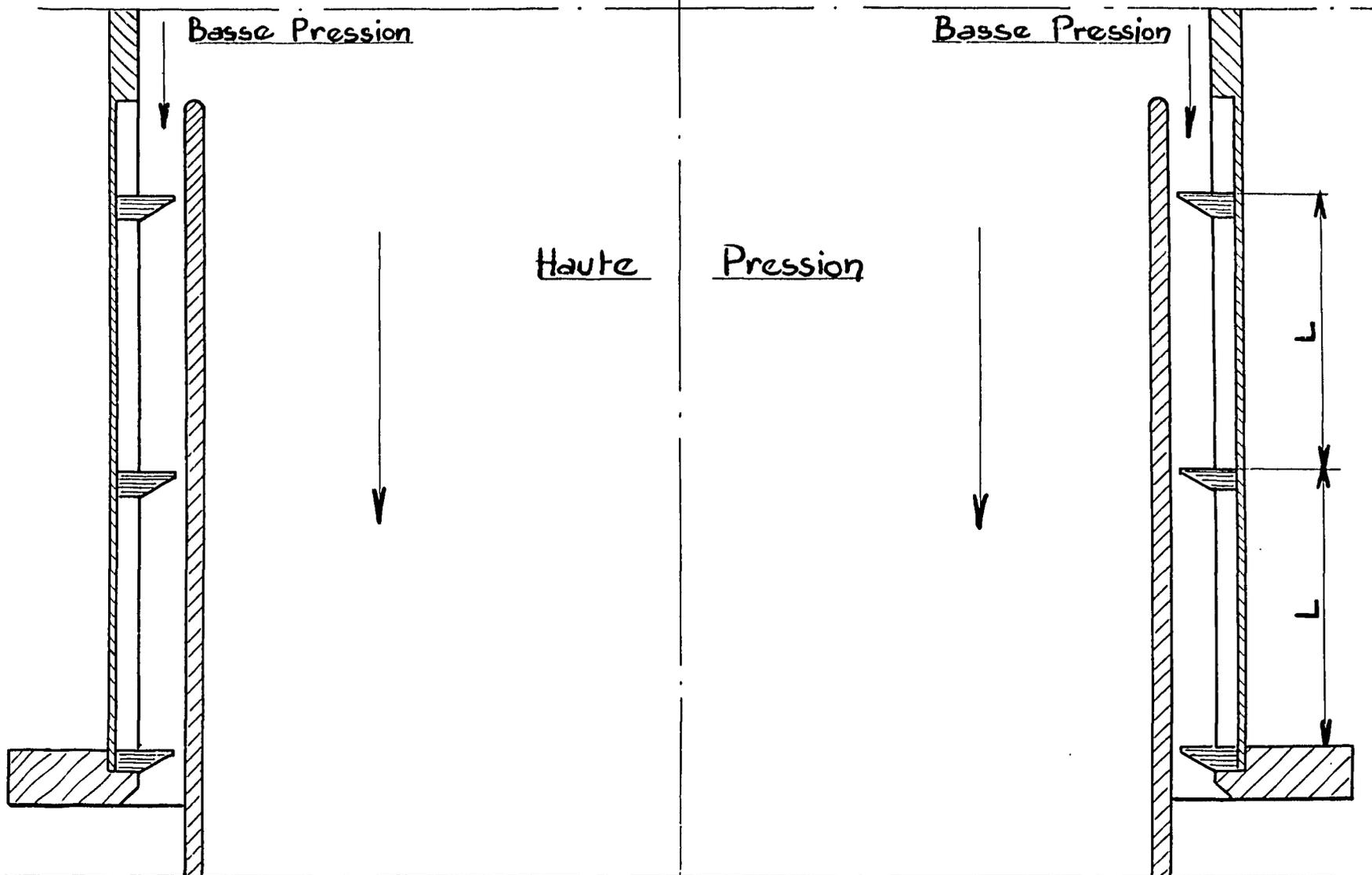
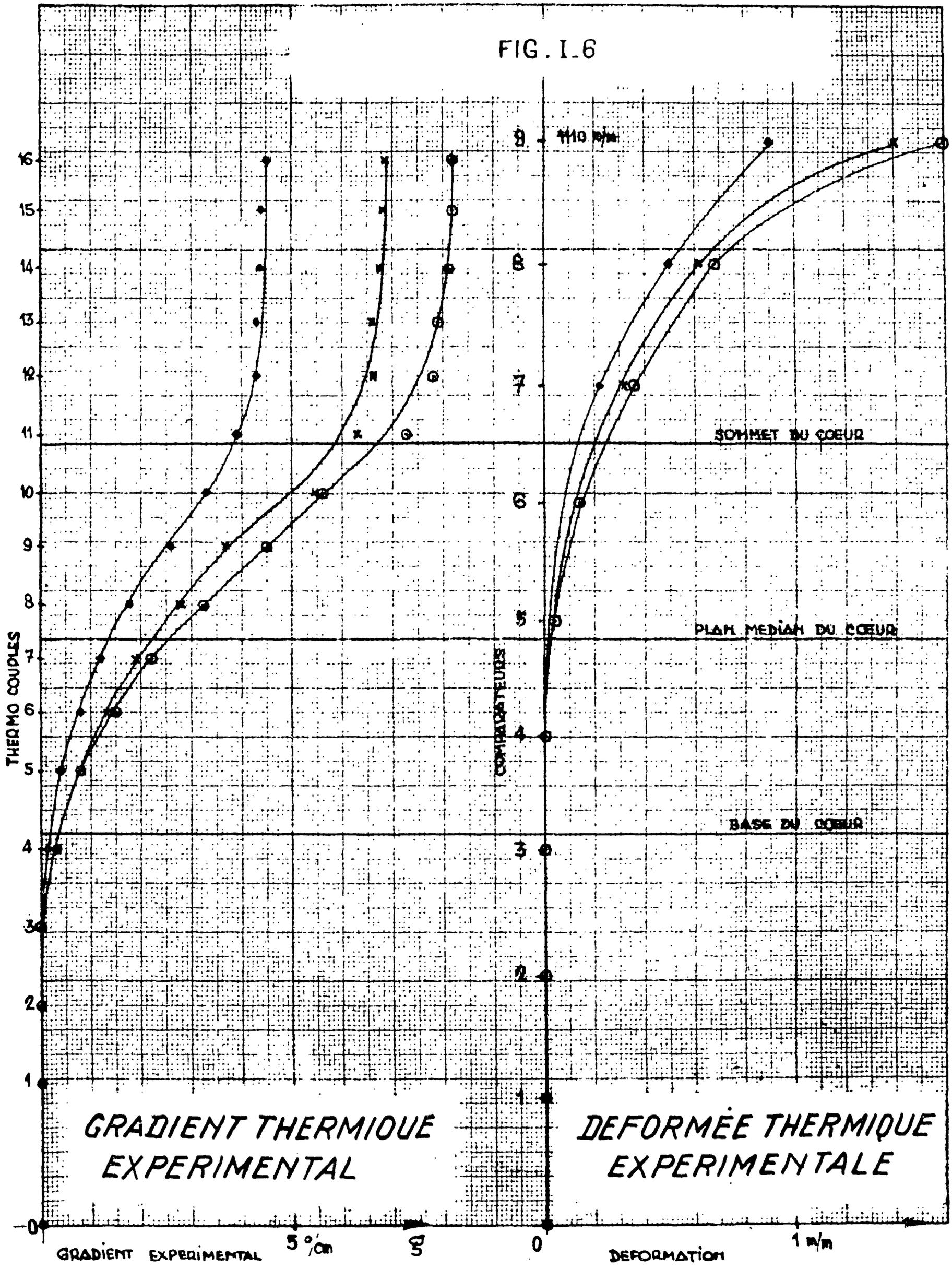


FIG. I.6





EFFECT D'UNE REACTION EN TÊTE

GRADIENT THERMIQUE °C/m

FIG. I.7

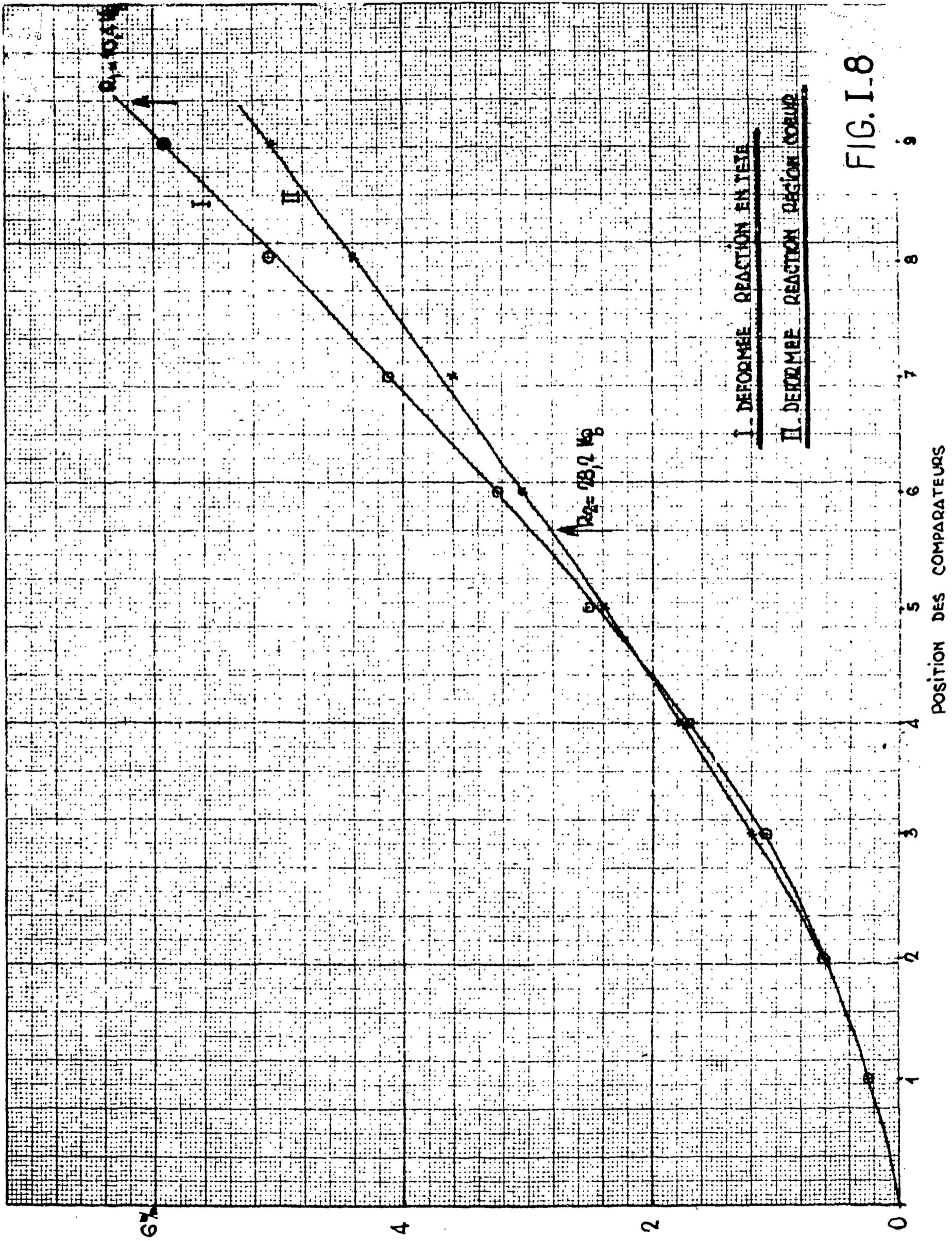
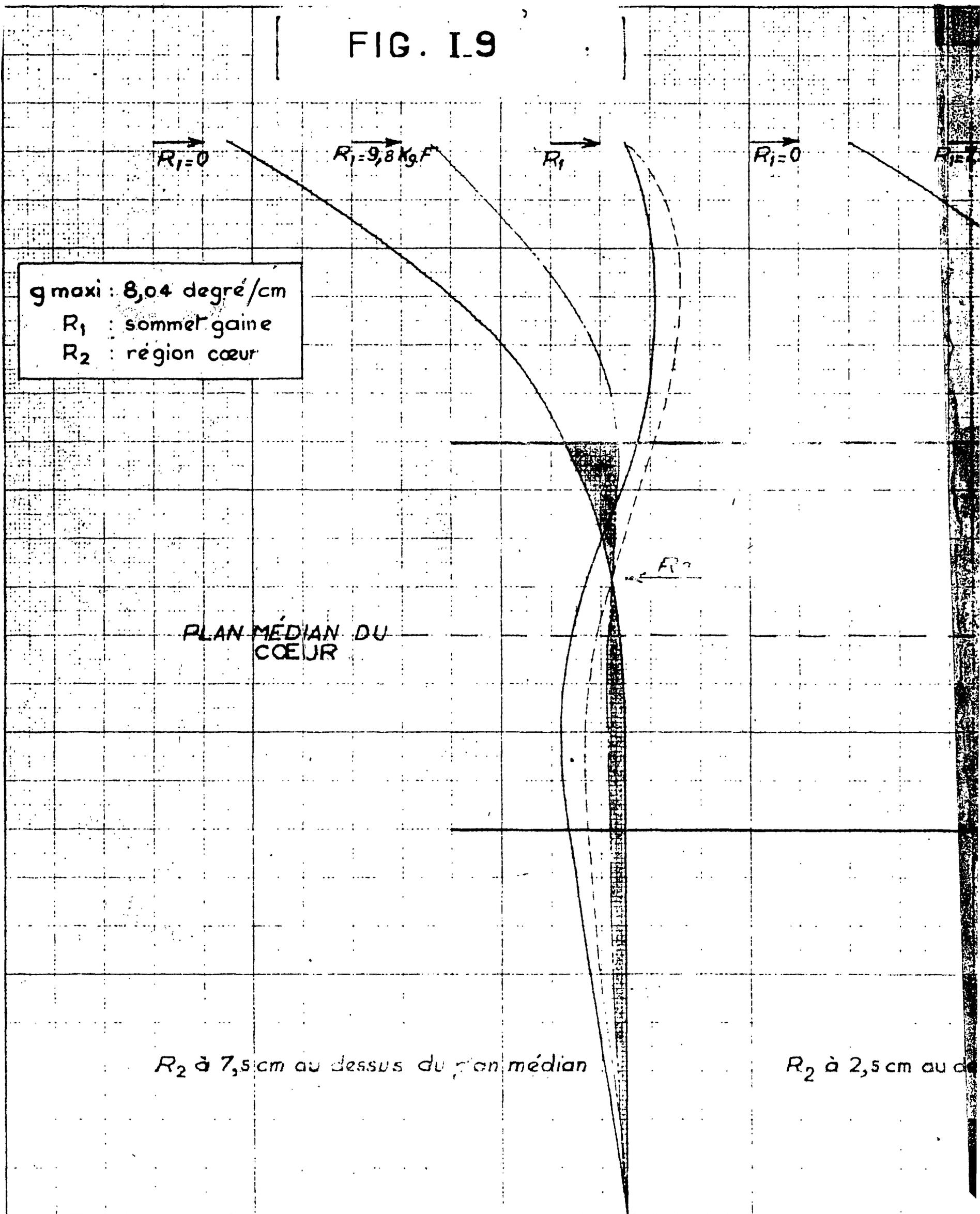
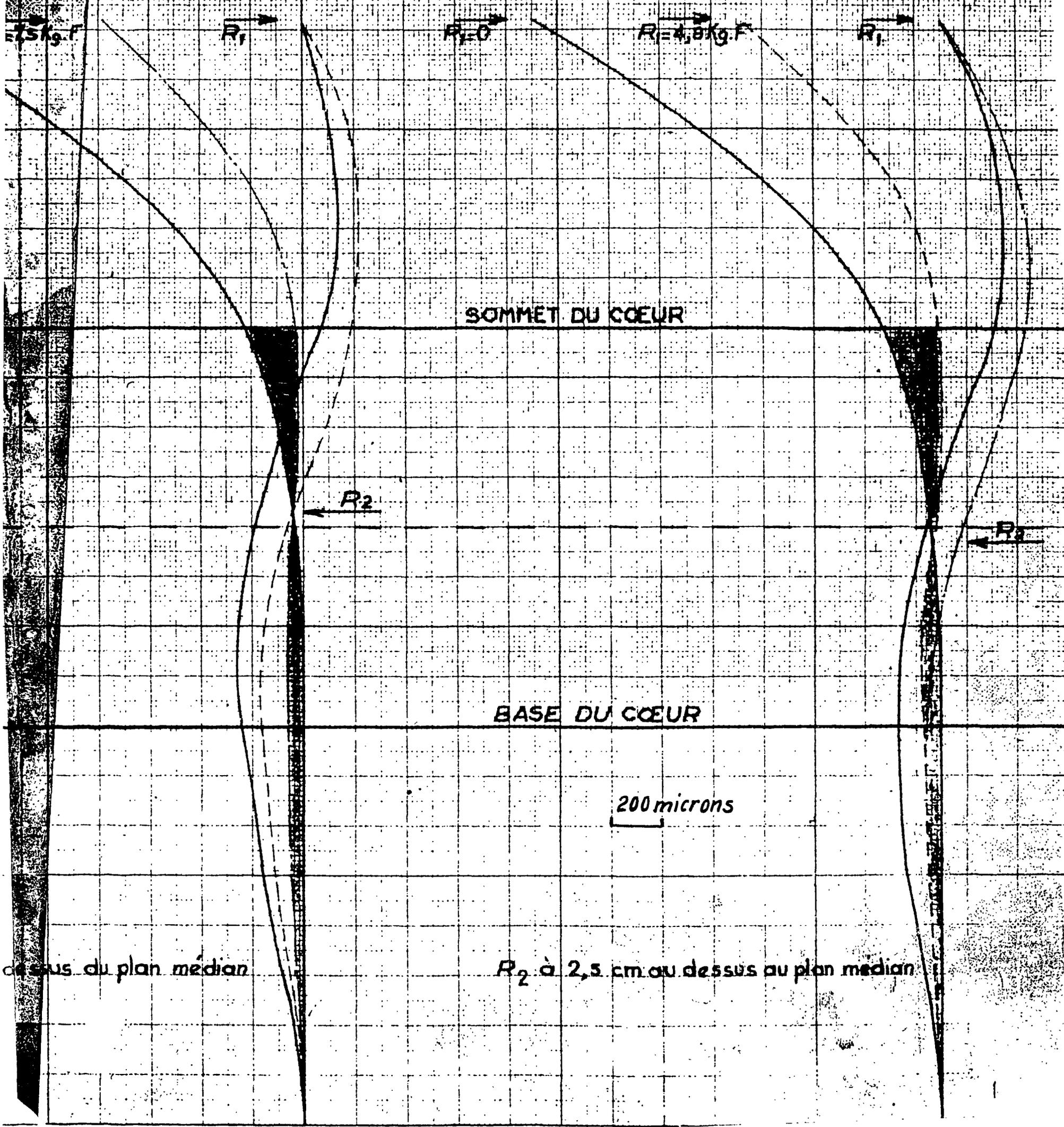


FIG. I-8

FIG. I.9

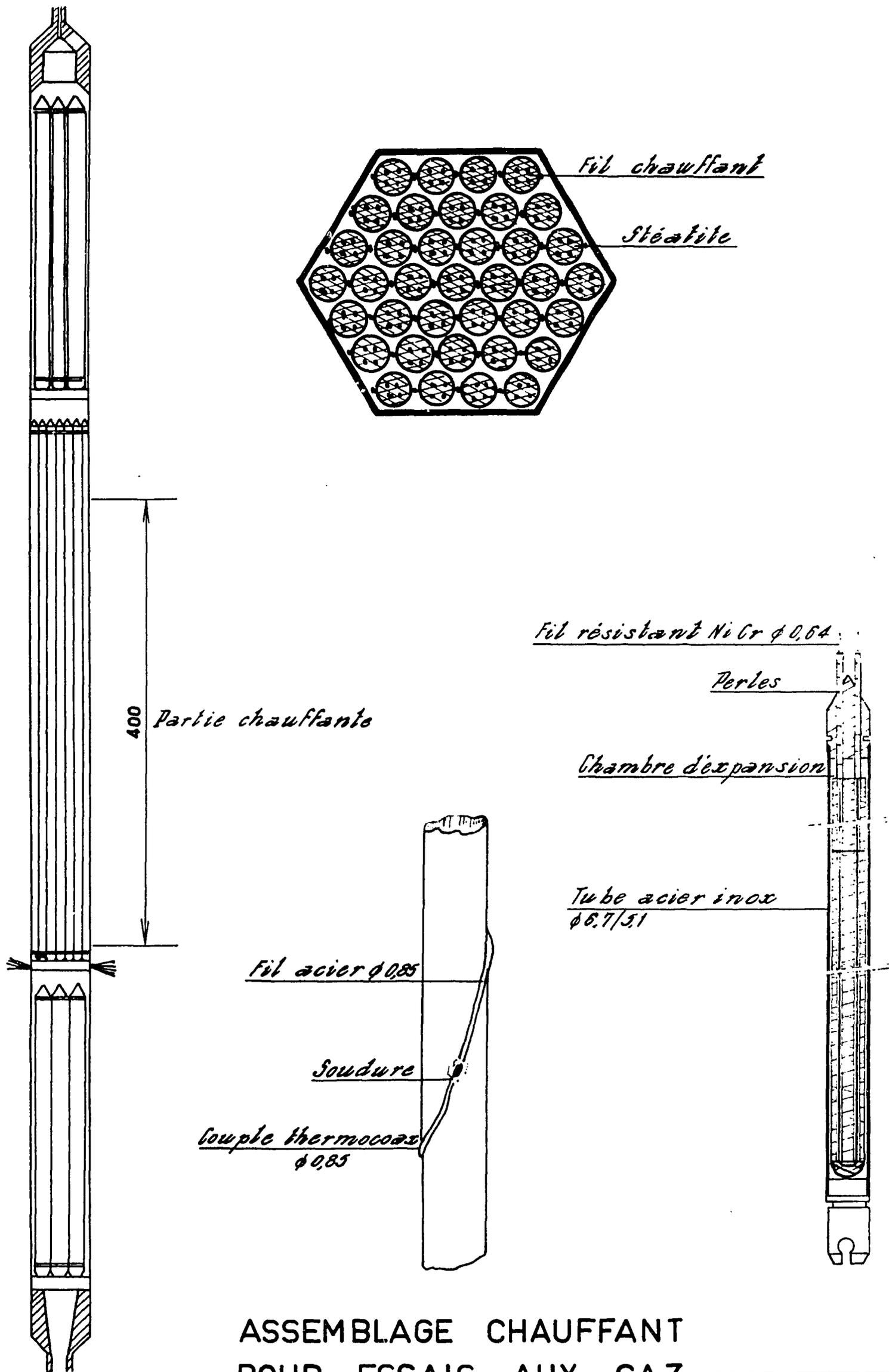


DÉFORMÉES SOUS GRADIENT THERMIQUE
ET SOUS RÉACTION
Gaine encastrée à sa base



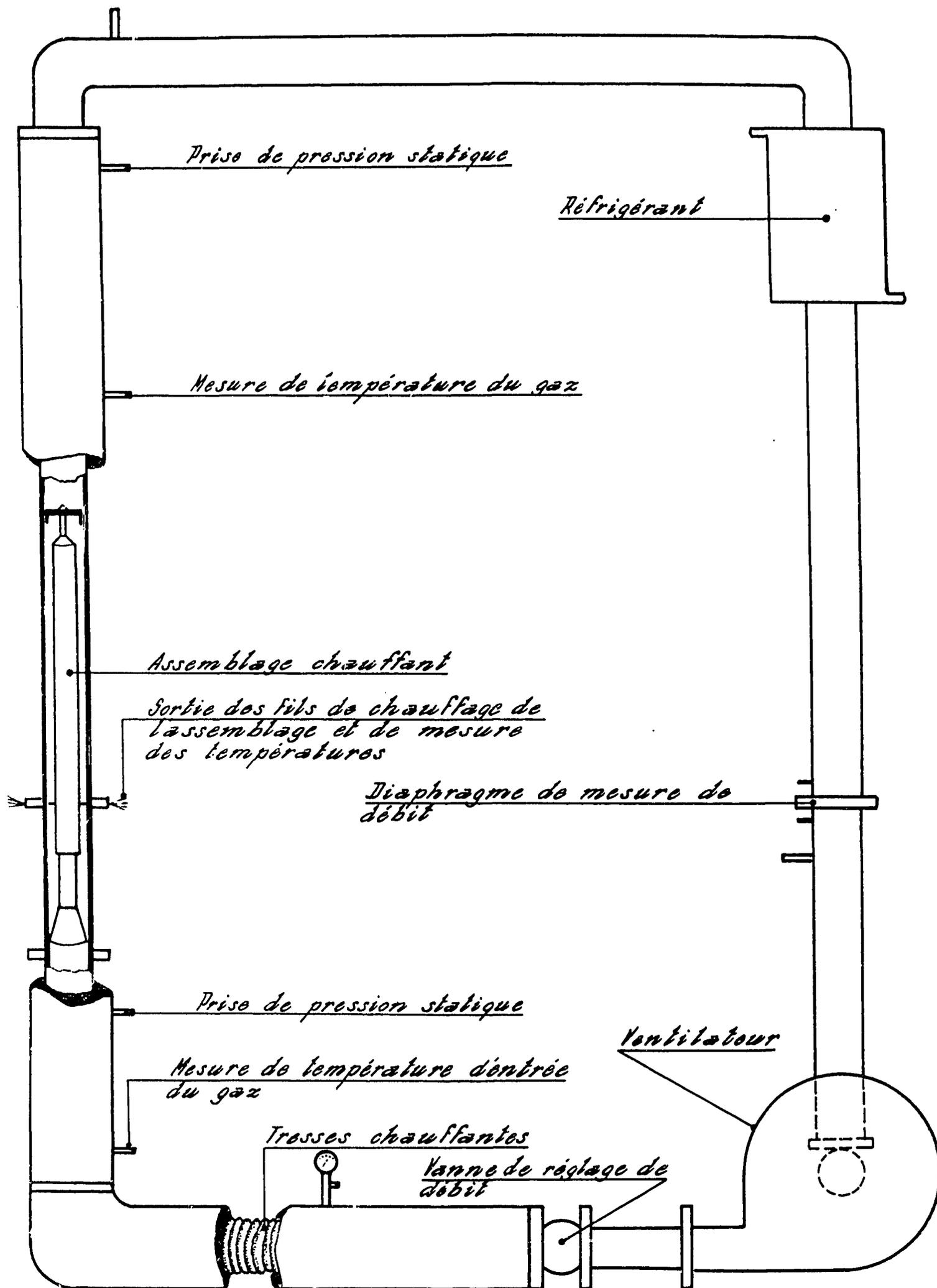
casus du plan médian

R₂ à 2,5 cm au dessus du plan médian



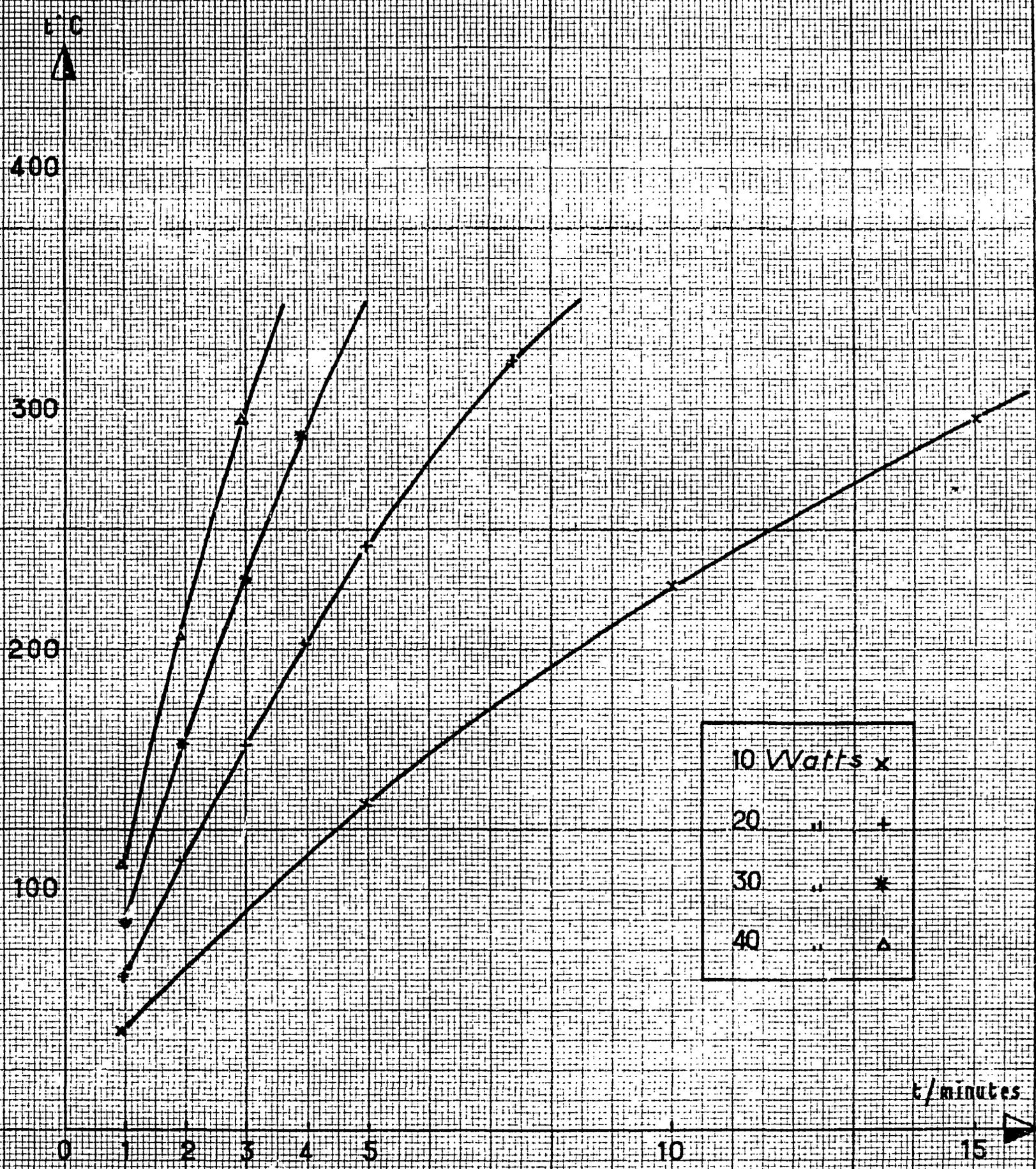
ASSEMBLAGE CHAUFFANT
 POUR ESSAIS AUX GAZ

Figure I 10



ENSEMBLE DE L'INSTALLATION
 POUR ESSAIS A L'ARGON

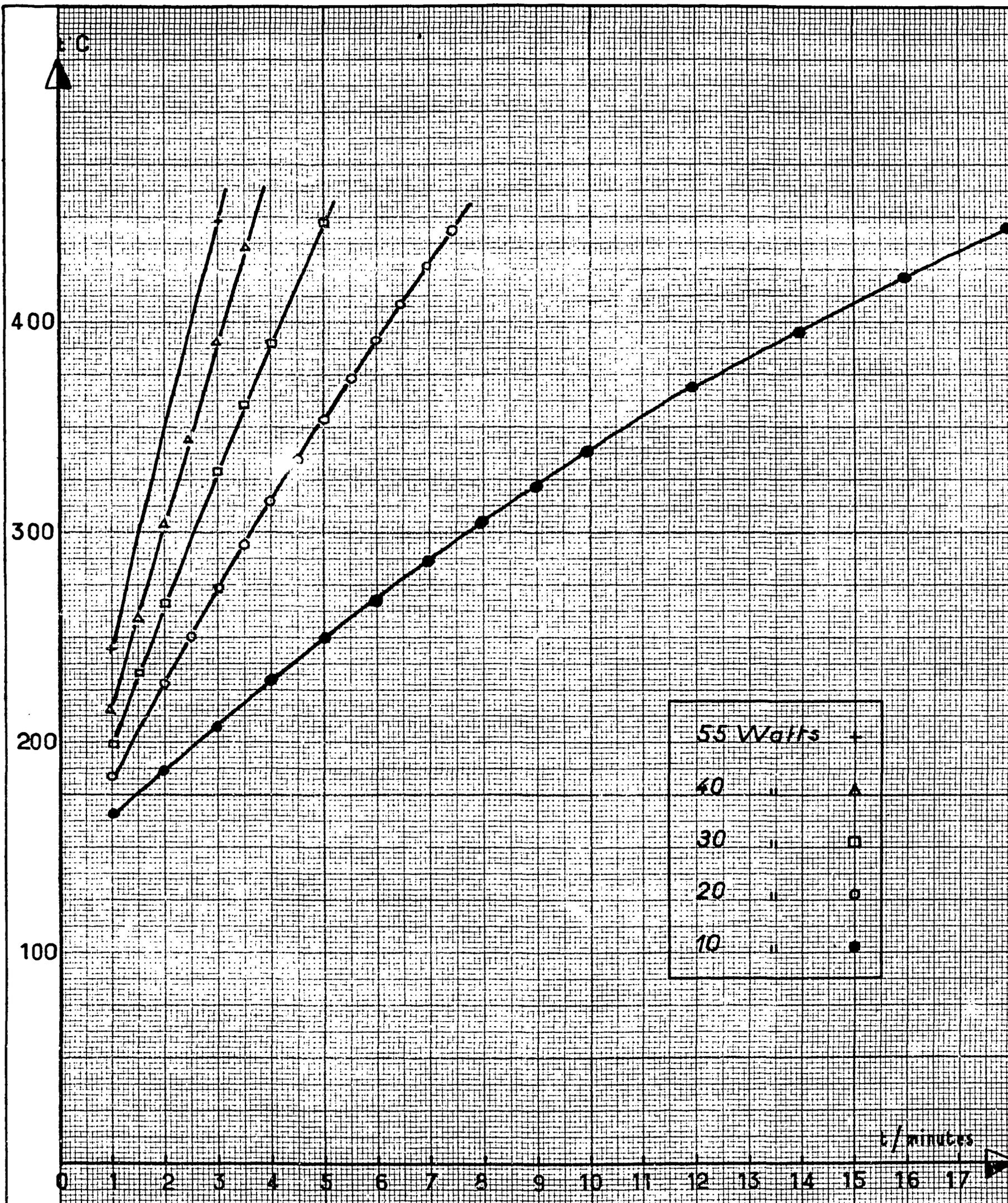
Figure I 11



ÉCHAUFFEMENT DE L'ASSEMBLAGE EN FONCTION DU TEMPS

CONVECTION NATURELLE ASSEMBLAGE DANS AIR A 20°

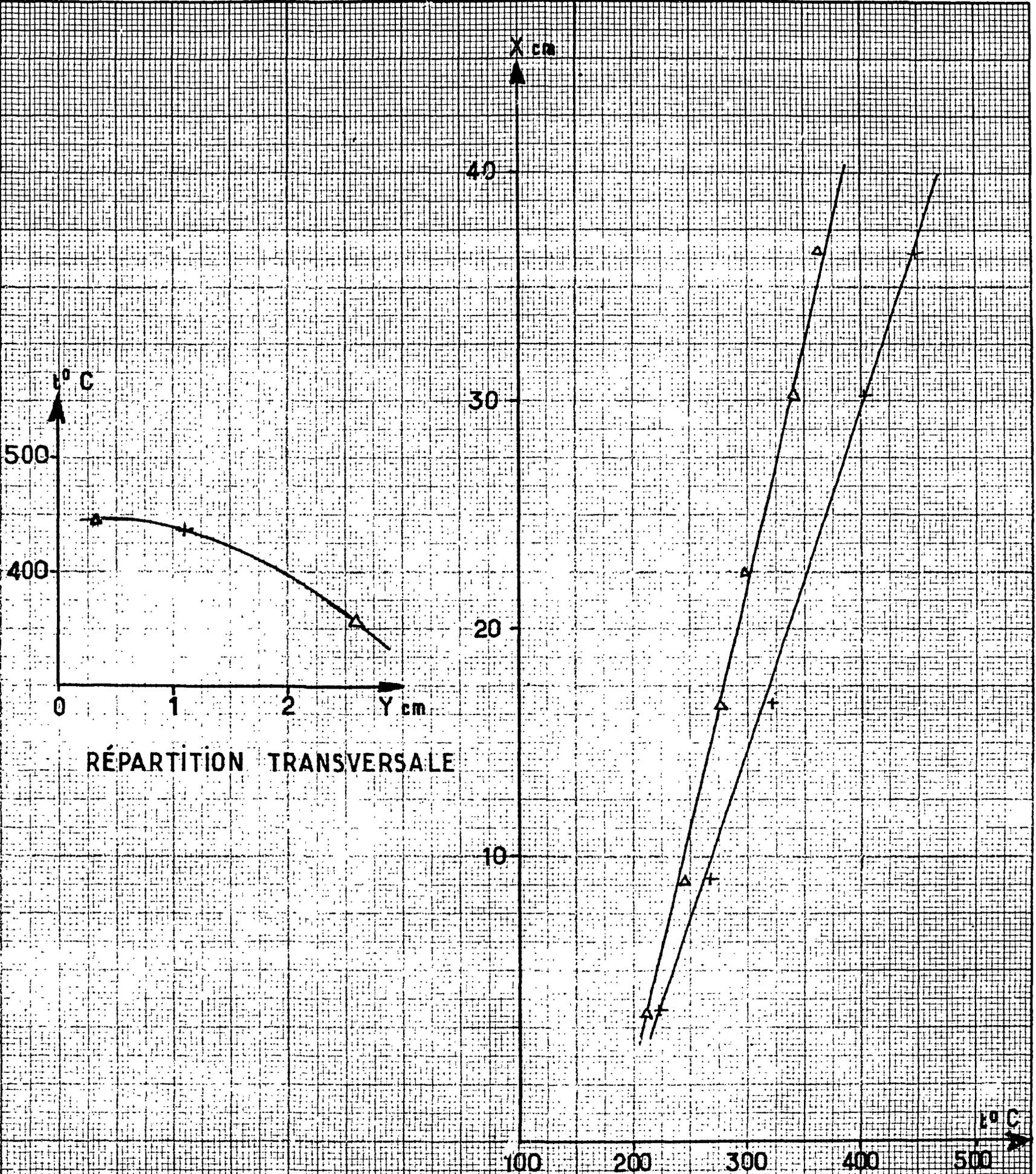
Figure I 12



ECHAUFFEMENT DE L'ASSEMBLAGE EN FONCTION DU TEMPS

CONVECTION NATURELLE AVEC TIRAGE DANS L'ARGON A 150

Figure I 13



RÉPARTITION TRANSVERSALE

RÉPARTITION LONGITUDINALE

DISTRIBUTION DES TEMPÉRATURES DANS L'ASSEMBLAGE

ESSAI A L'ARGON

CIRCULATION FORCÉE

DÉBIT : 17,45 g/sec

PUISSANCE DÉGAGÉE : 2000 WATTS

Figure I 14

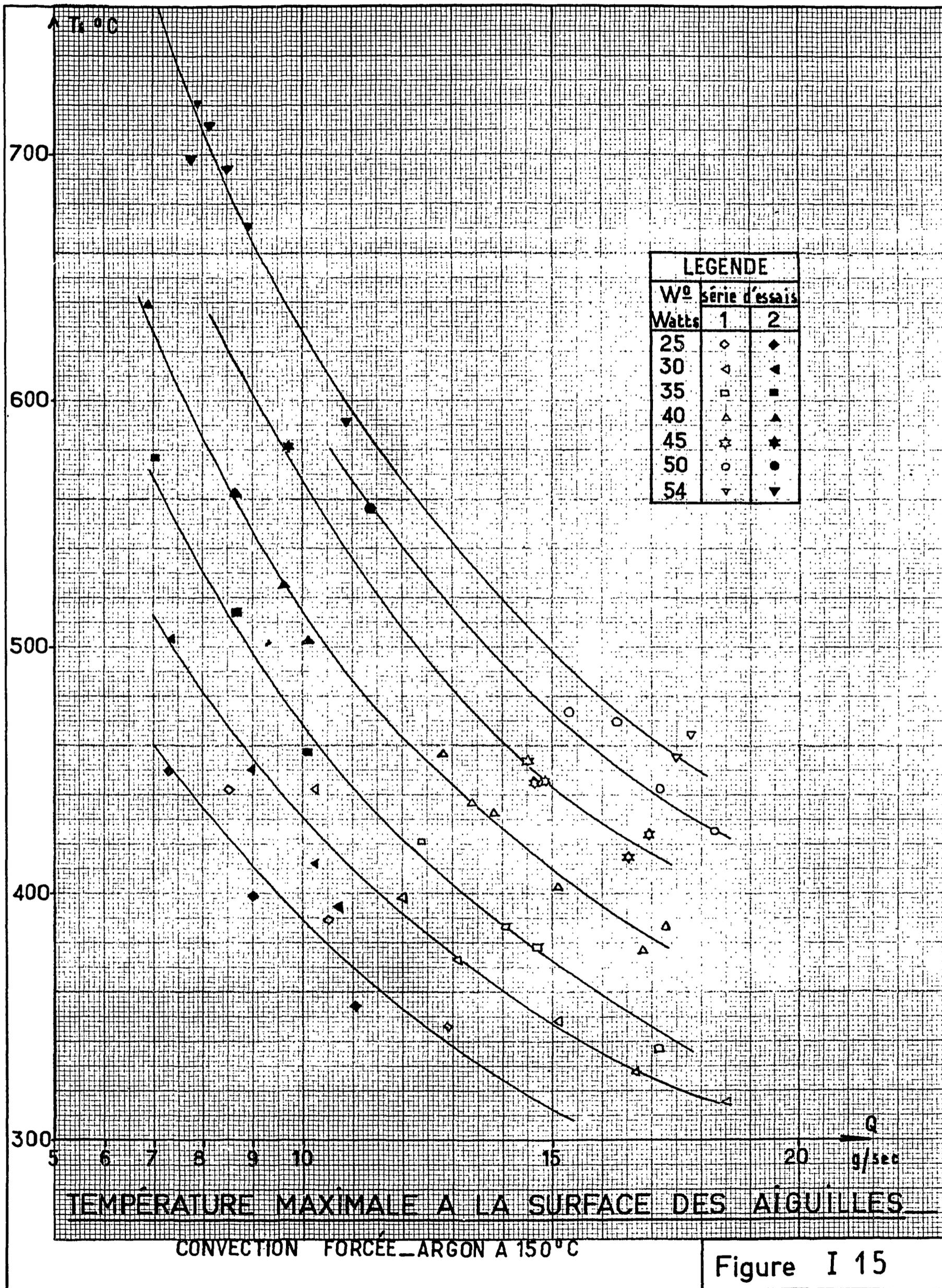
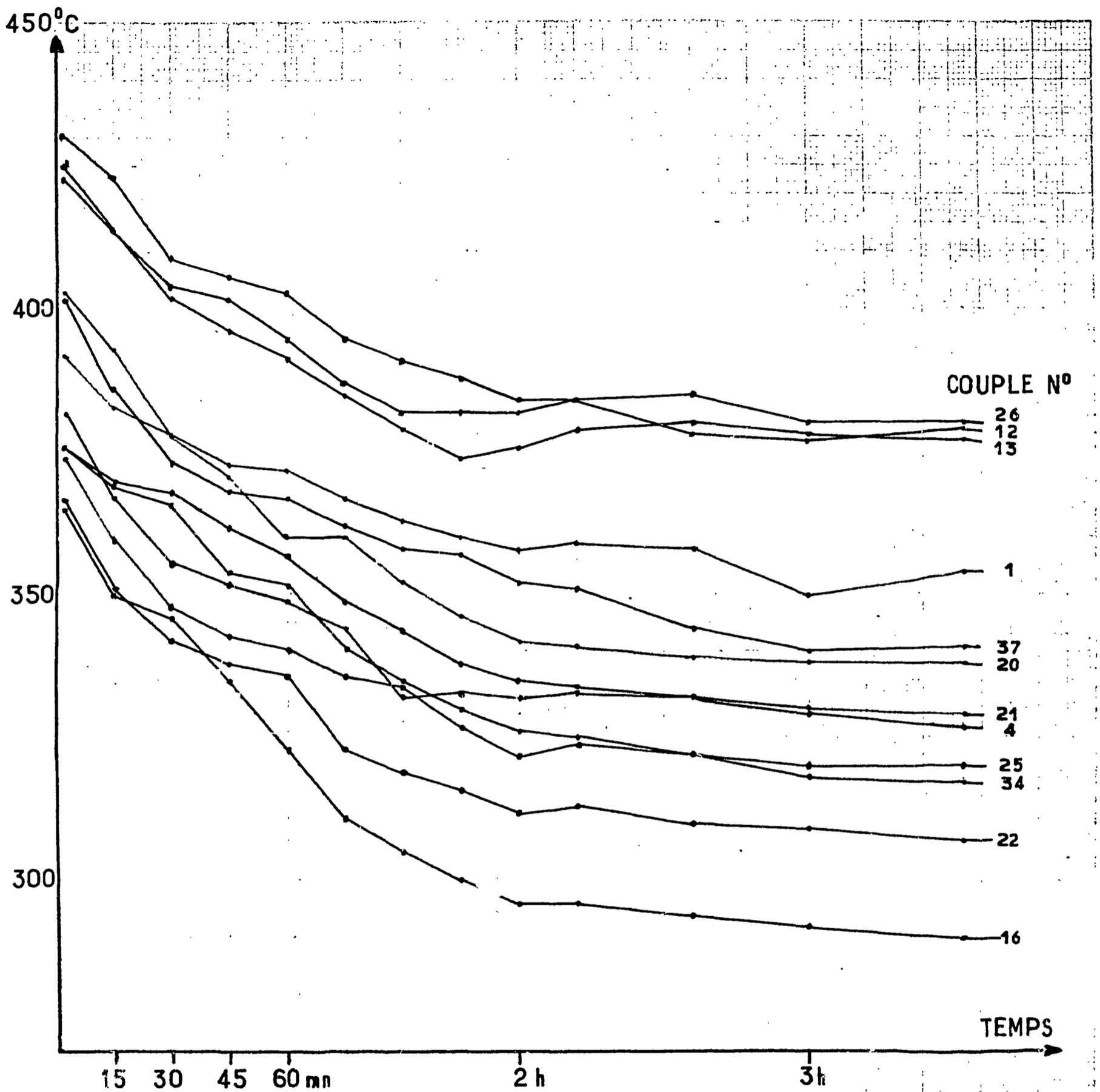


Figure I 15



IMMERSION DE L'ASSEMBLAGE DANS LE PLOMB

EVOLUTION DES TEMPERATURES DANS L'ASSEMBLAGE

Figure I 16

STRUCTURE DU GRAND
BOUCHON TOURNANT

STRUCTURE DU PETIT
BOUCHON TOURNANT

RÉSISTANCE CHAUFFANTE

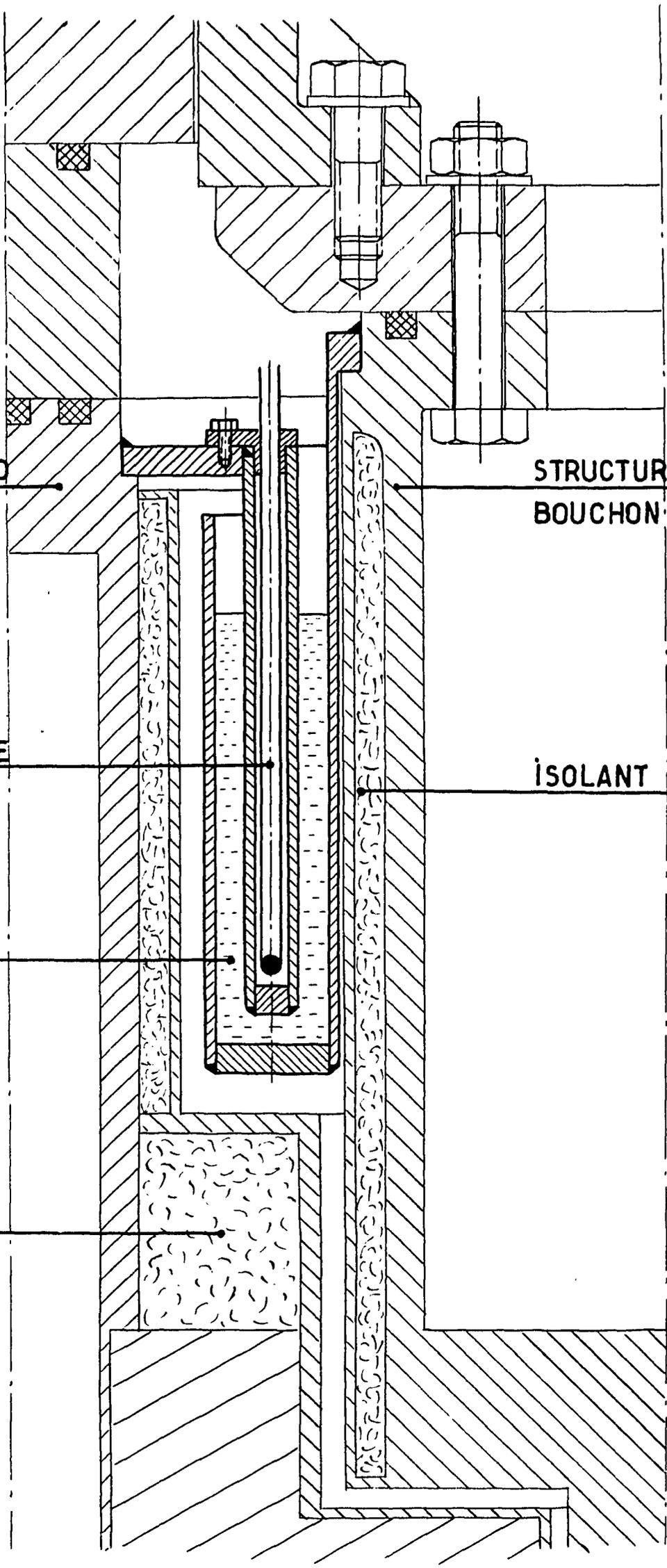
ISOLANT THERMIQUE

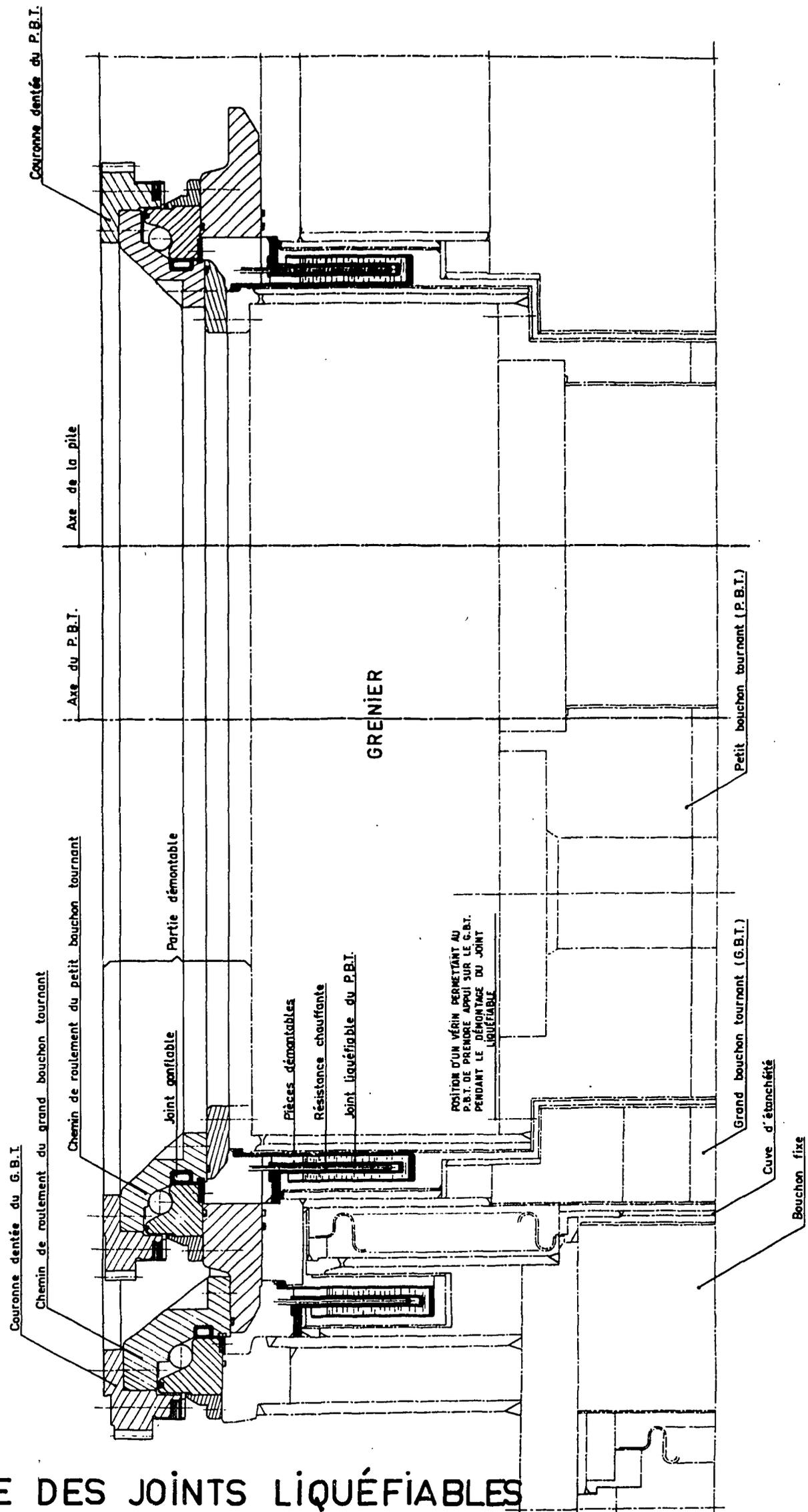
JOINT

ISOLANT THERMIQUE

JOINT MÉTALLIQUE LIQUÉFIABLE

Figure I 17

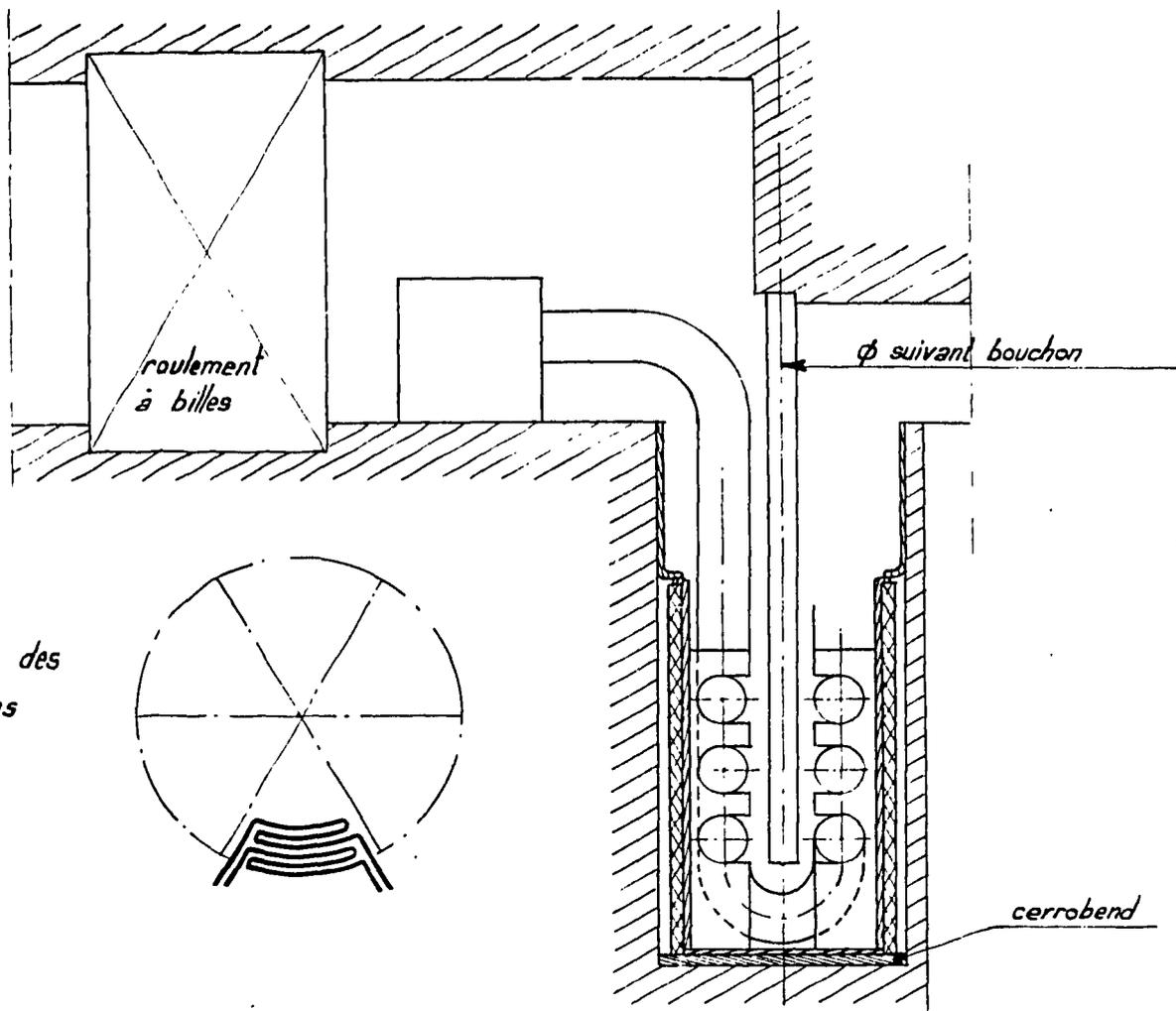
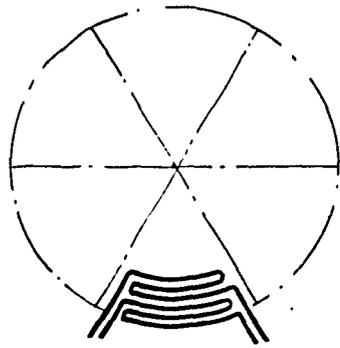




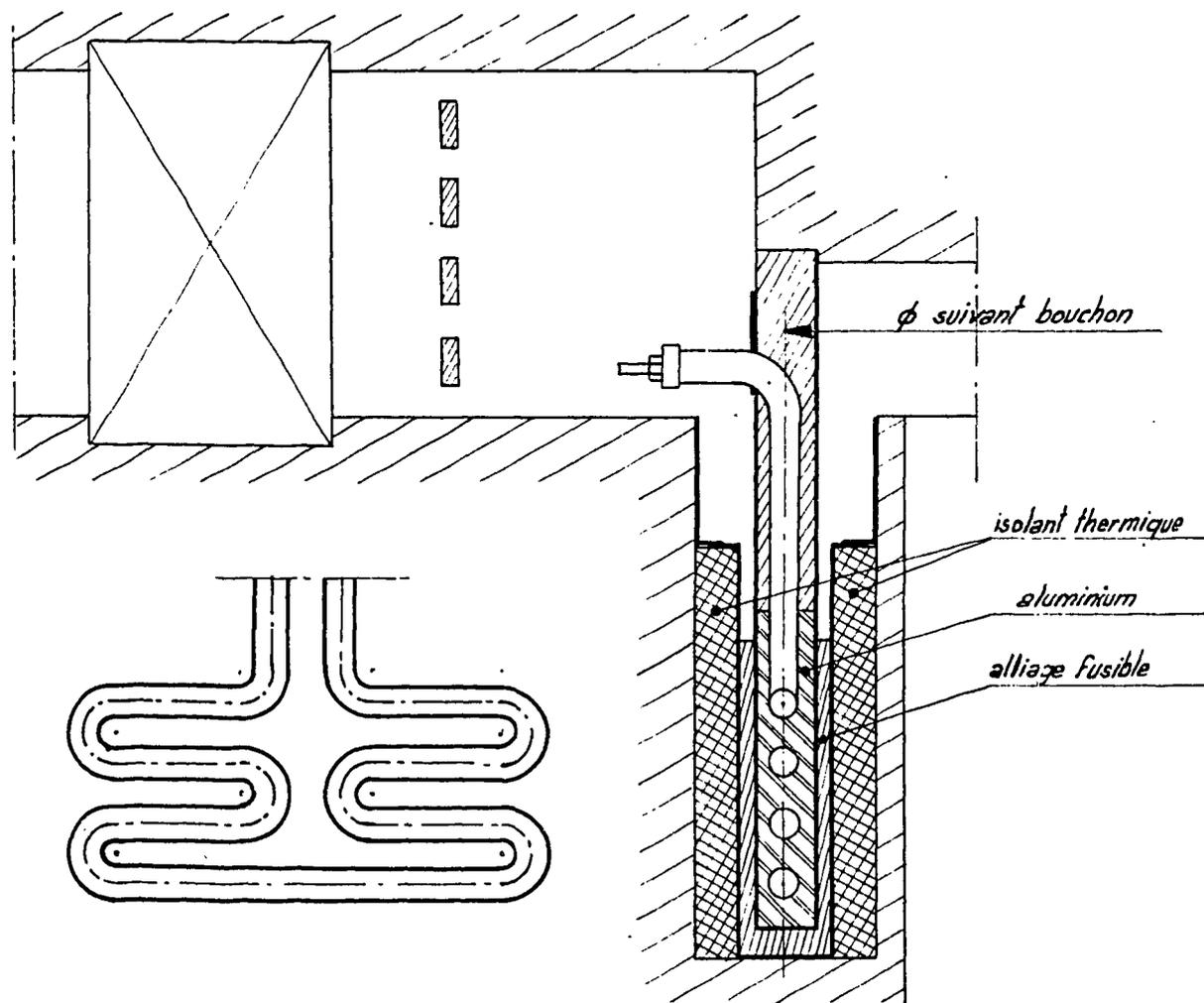
MONTAGE DES JOINTS LIQUÉFIABLES
DANS LES BOUCHONS TOURNANTS

Figure I 18

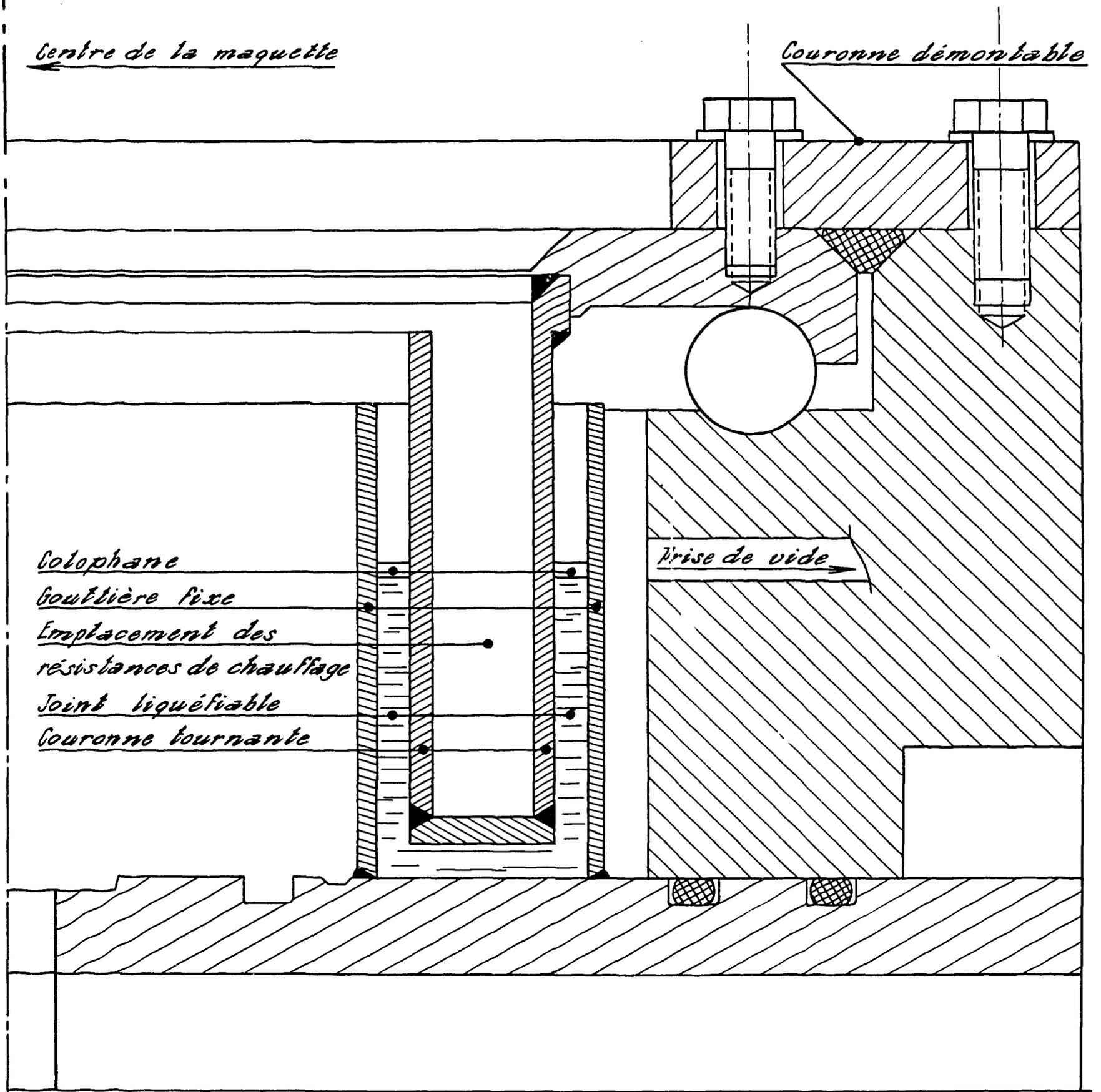
répartition des résistances



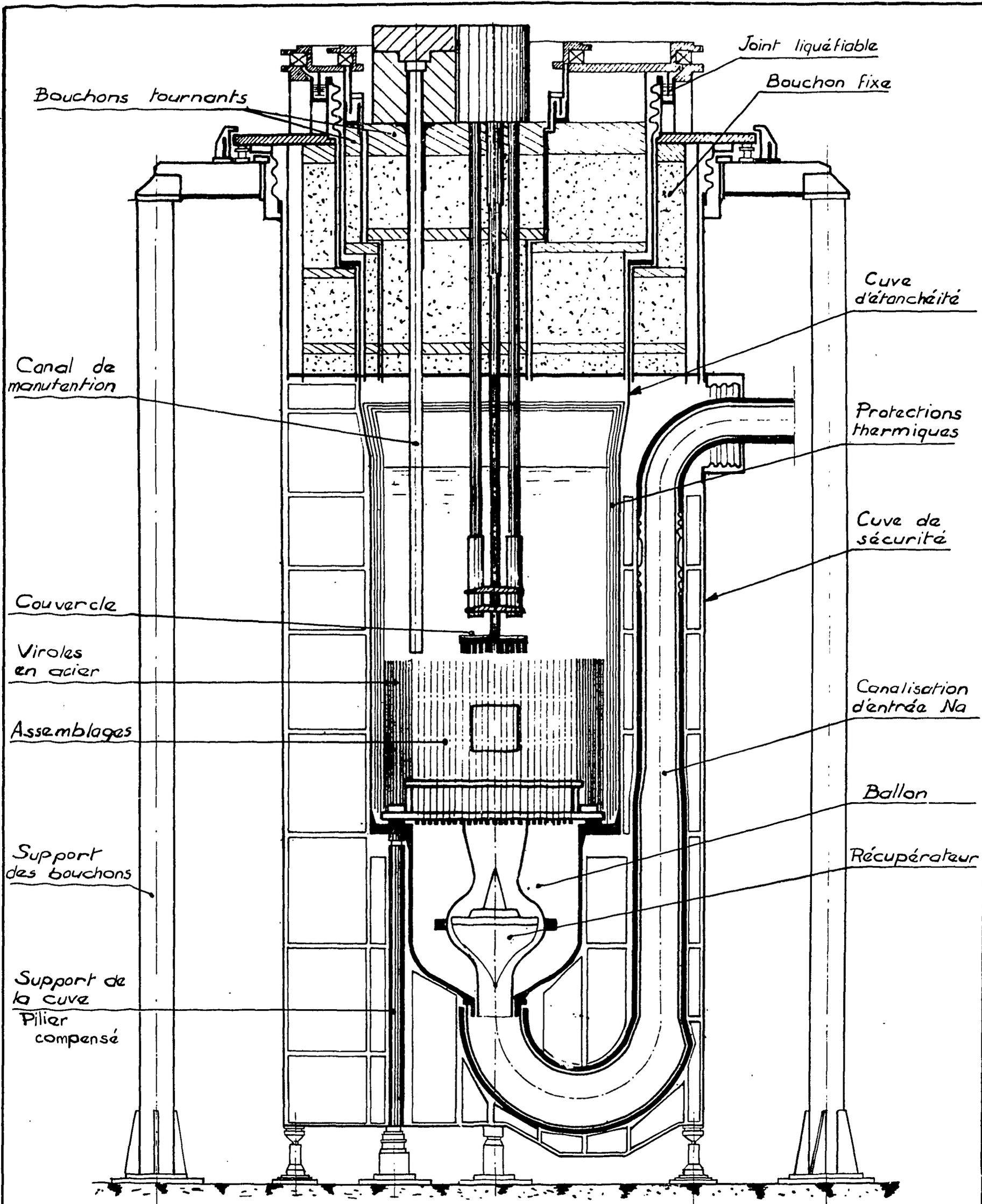
MAQUETTE DE DIAMETRE 300mm
Résistance immergée



MAQUETTE DE DIAMETRE 300mm
Résistance dans la tôle d'étanchéité

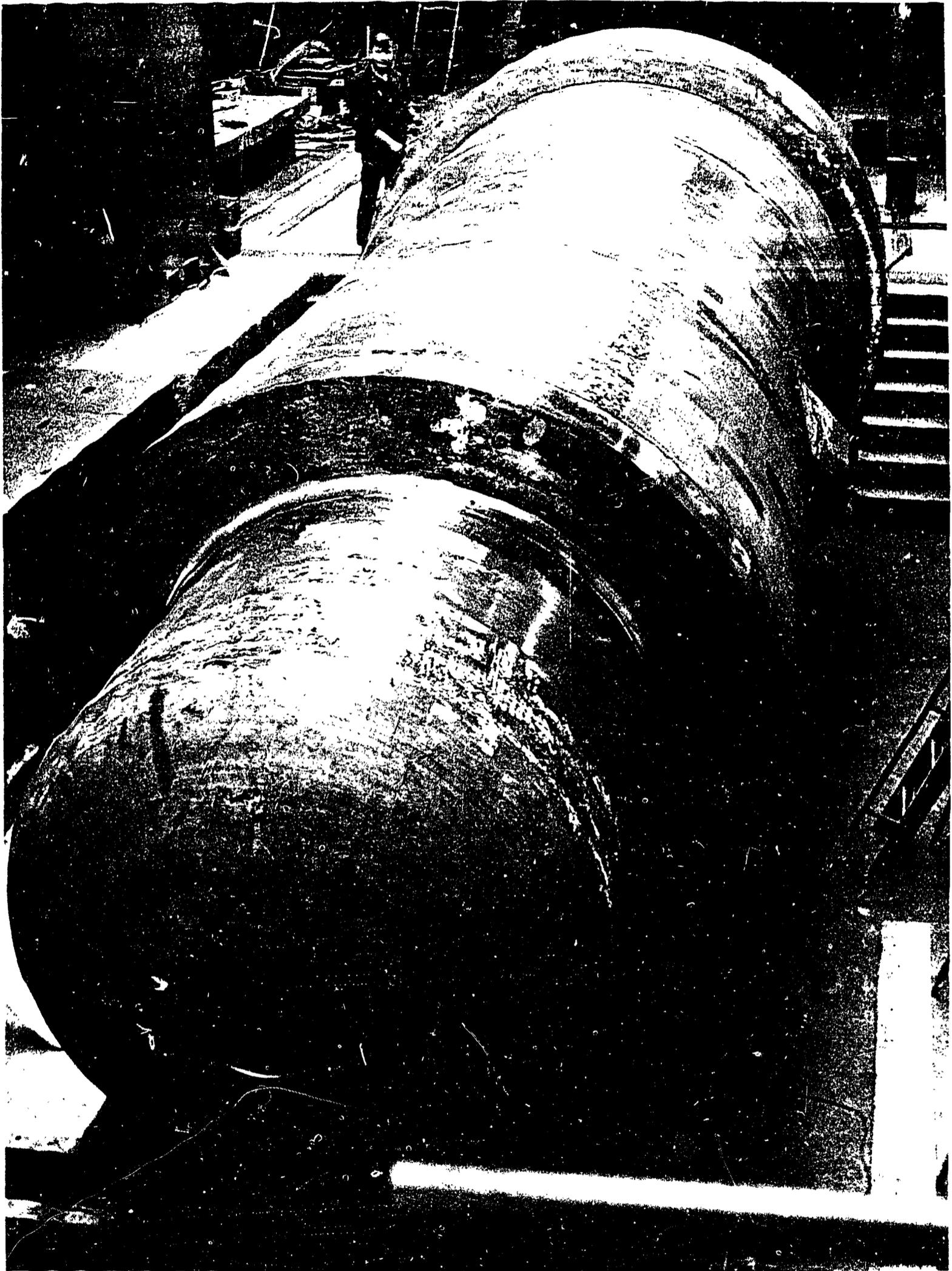


MAQUETTE DE DIAMÈTRE 3m.



MAQUETTE RAPSODIE
Coupe verticale

Figure I 21



CUVE D'ÉTANCHÉITÉ
EN COURS DE FABRICATION

Figure I 22

Chemin de roulement (Hotte primaire)

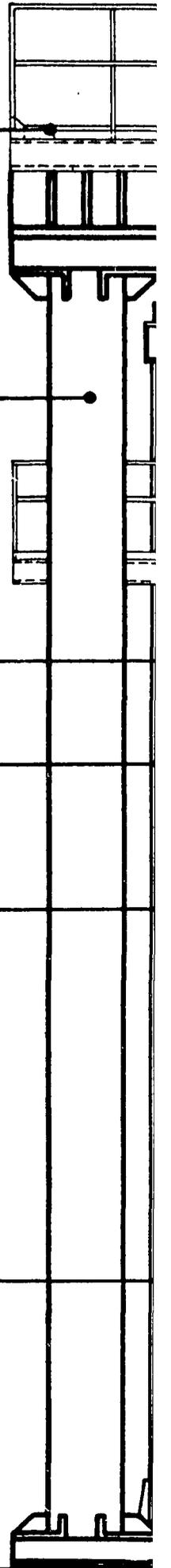
Charpente principale

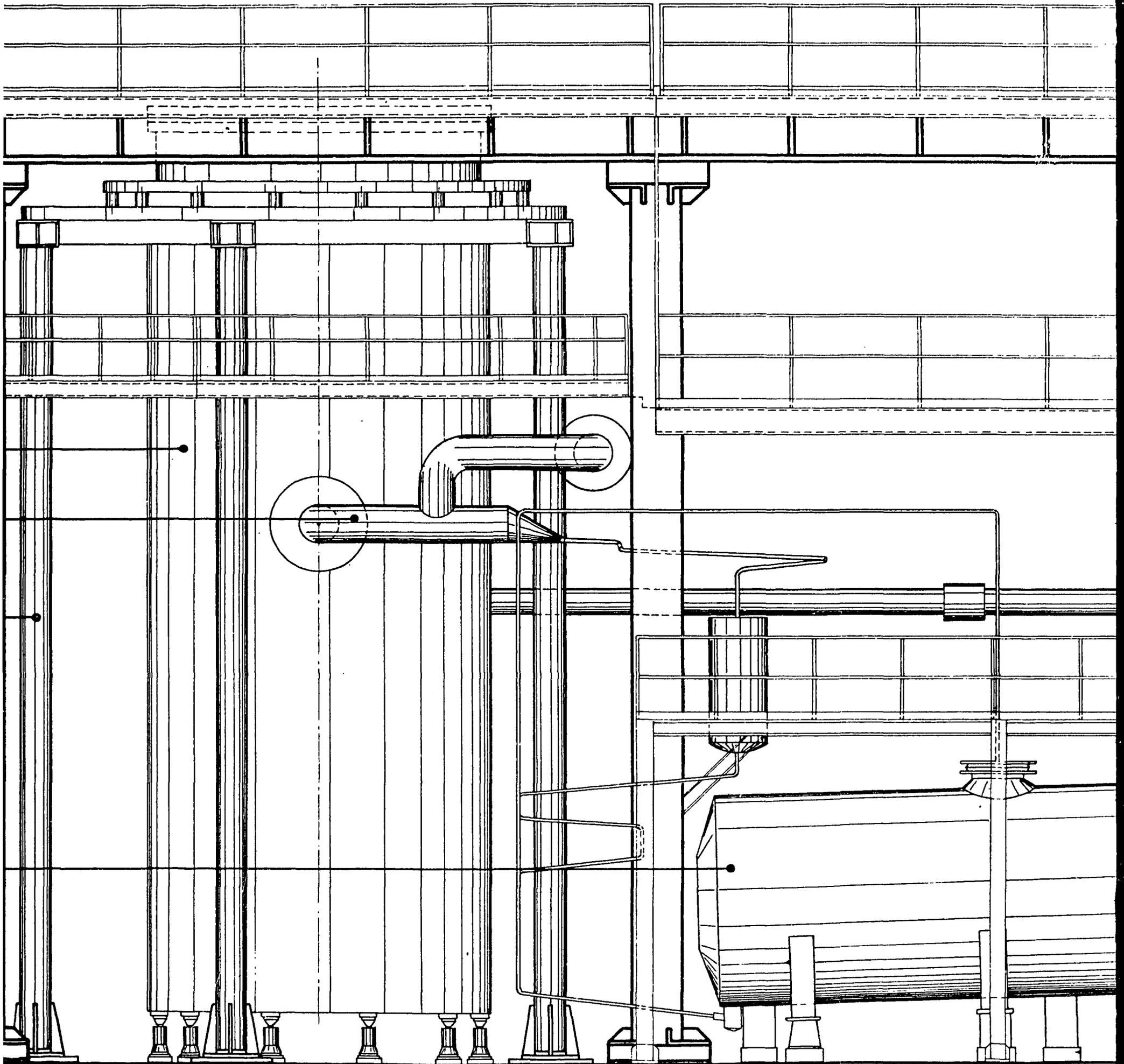
Cuve de sécurité

Canalisation de sortie sodium

Charpente des bouchons

Réservoir à sodium





INSTALLATIO
DANS LE

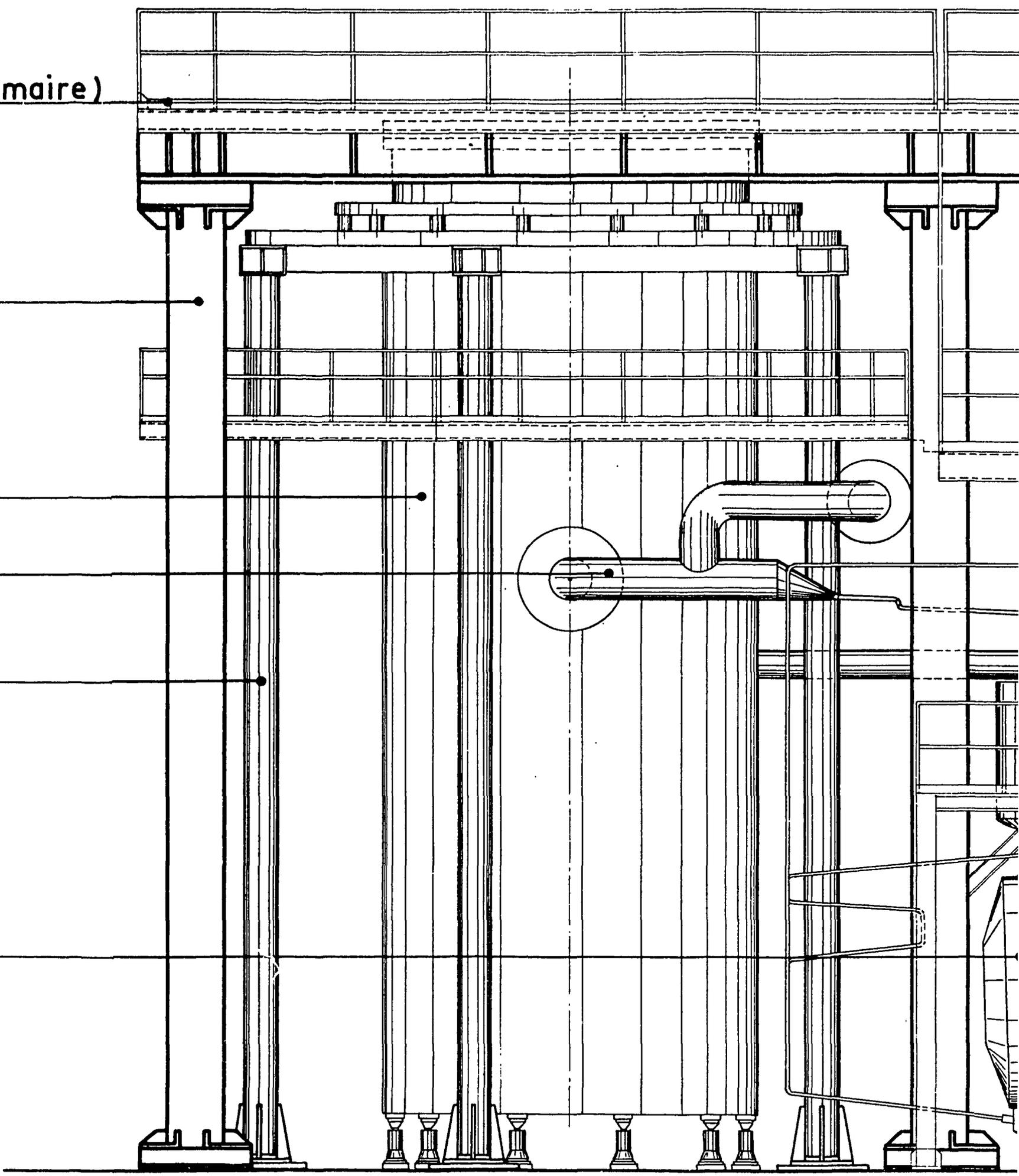
ment (Hotte primaire)

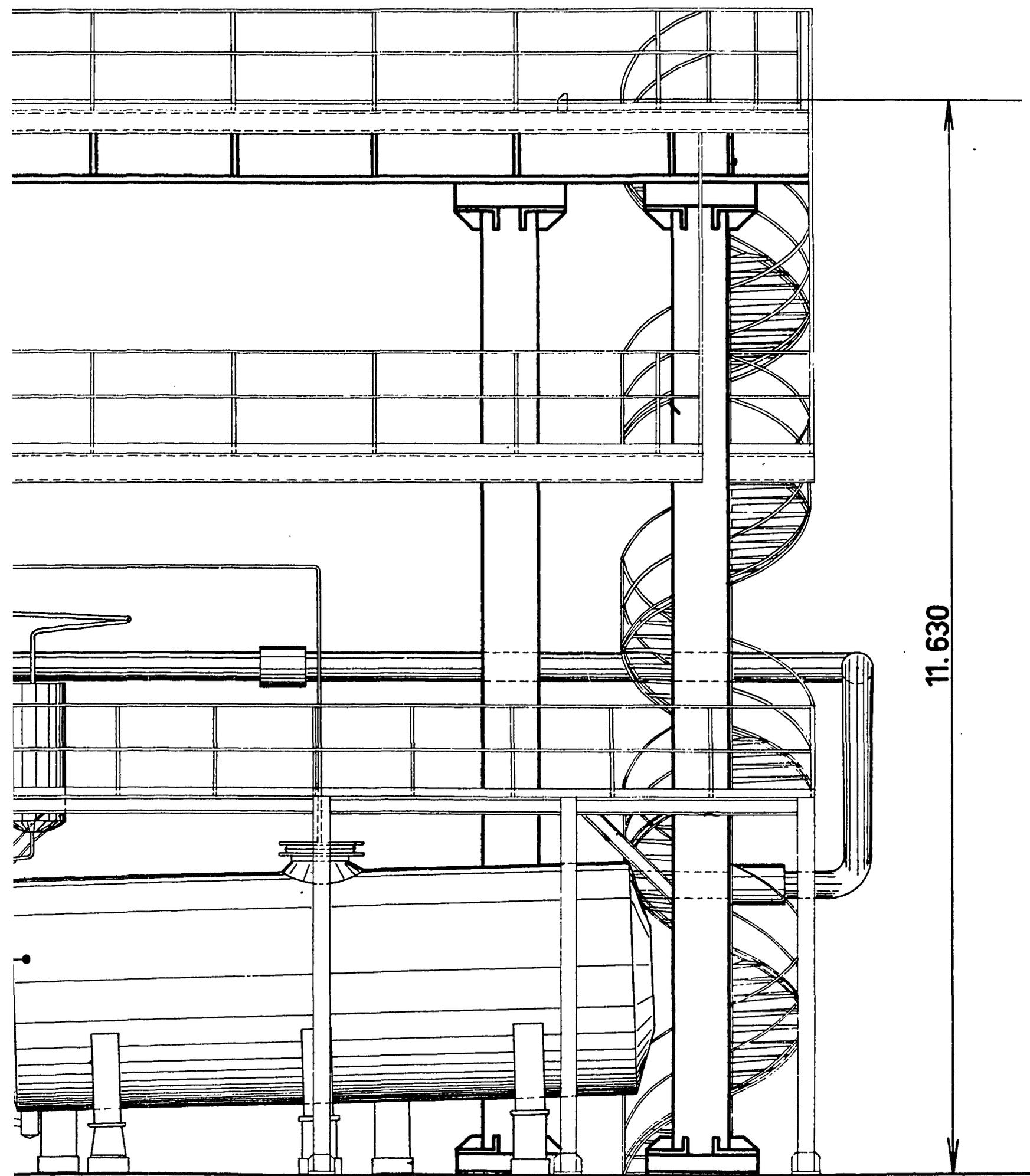
ale

rtie sodium

ouchons

m

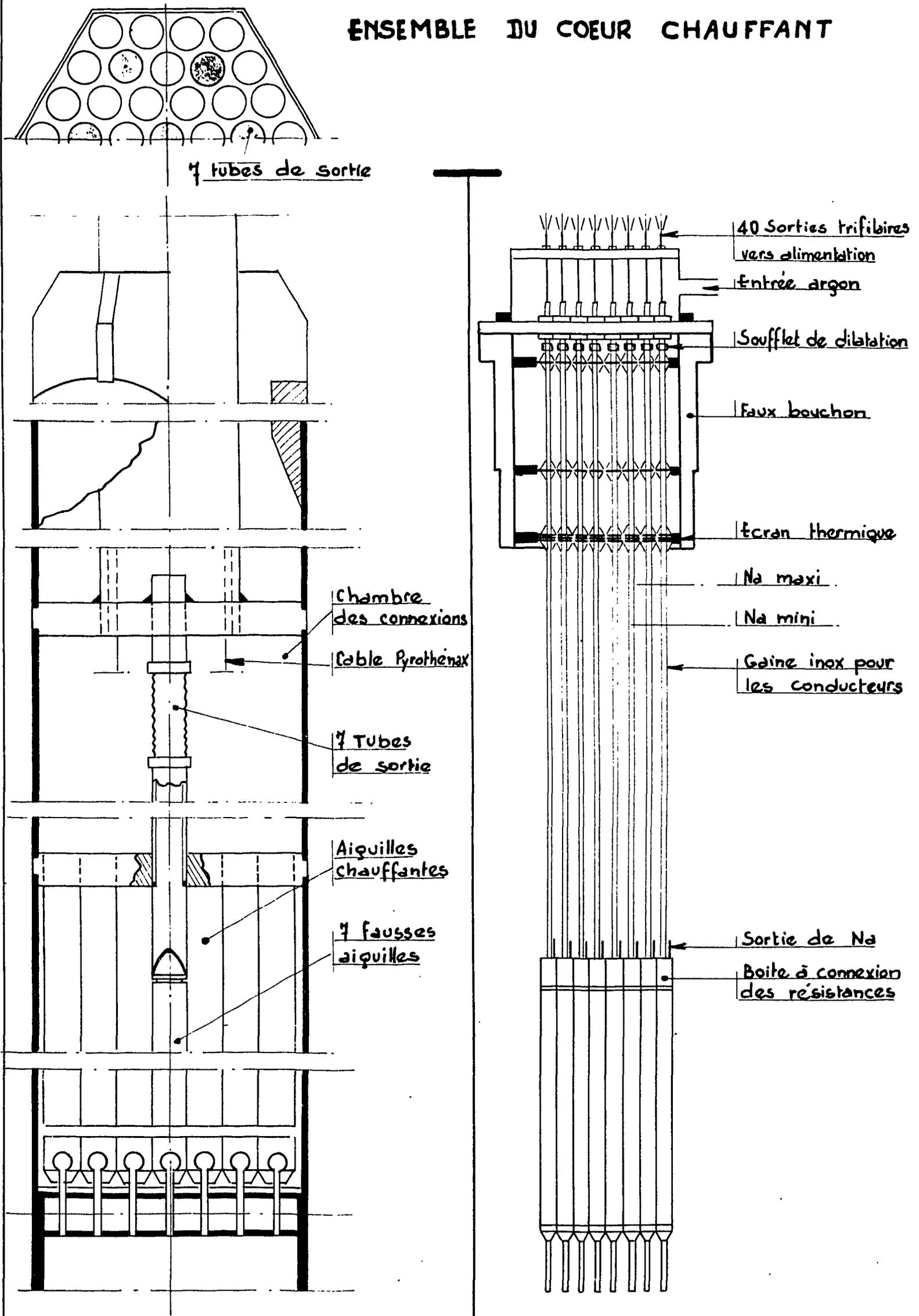




INSTALLATION DE LA MAQUETTE RAPSODIE
DANS LE HALL D'ESSAIS

Figure I 23

ENSEMBLE DU COEUR CHAUFFANT



7 tubes de sortie

Chambre des connexions

Cable Pyrothénax

7 Tubes de sortie

Aiguilles chauffantes

7 fausses aiguilles

COUPE BRISÉE

40 Sorties trifilaires vers alimentation

Entrée argon

Soufflet de dilatation

Faux bouchon

Ecran thermique

Na maxi

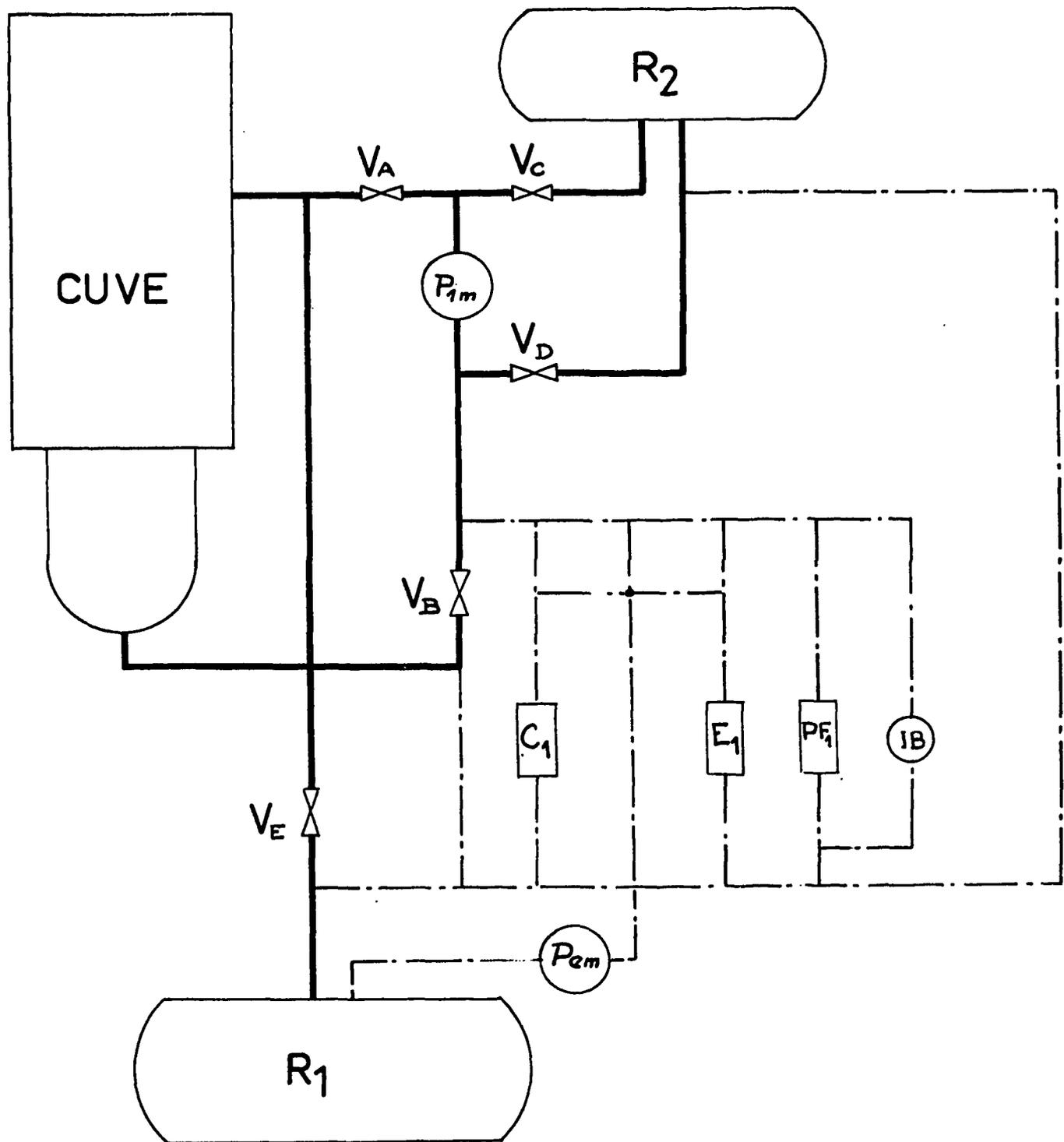
Na mini

Gaine inox pour les conducteurs

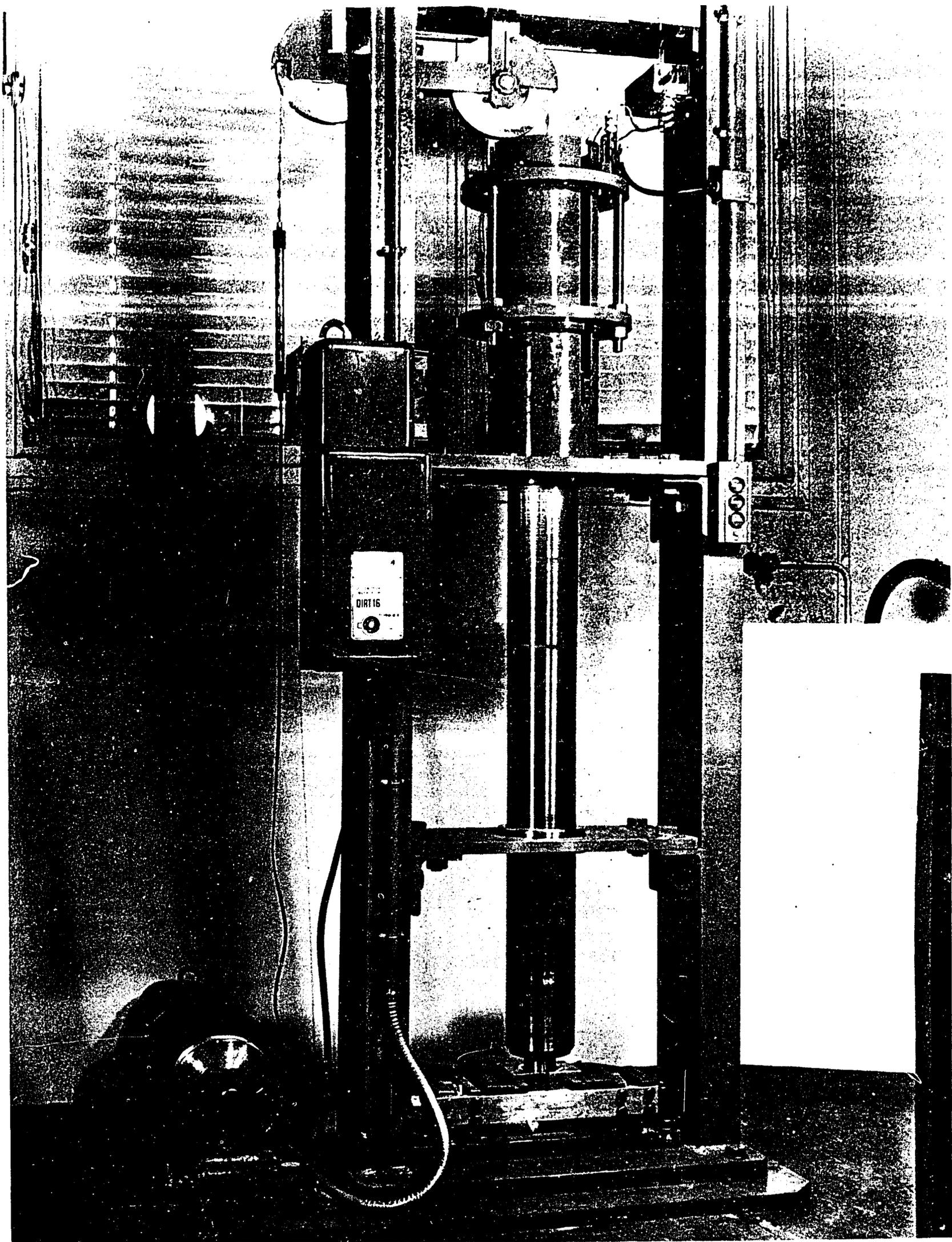
Sortie de Na

Boîte à connexion des résistances

Figure I, 24

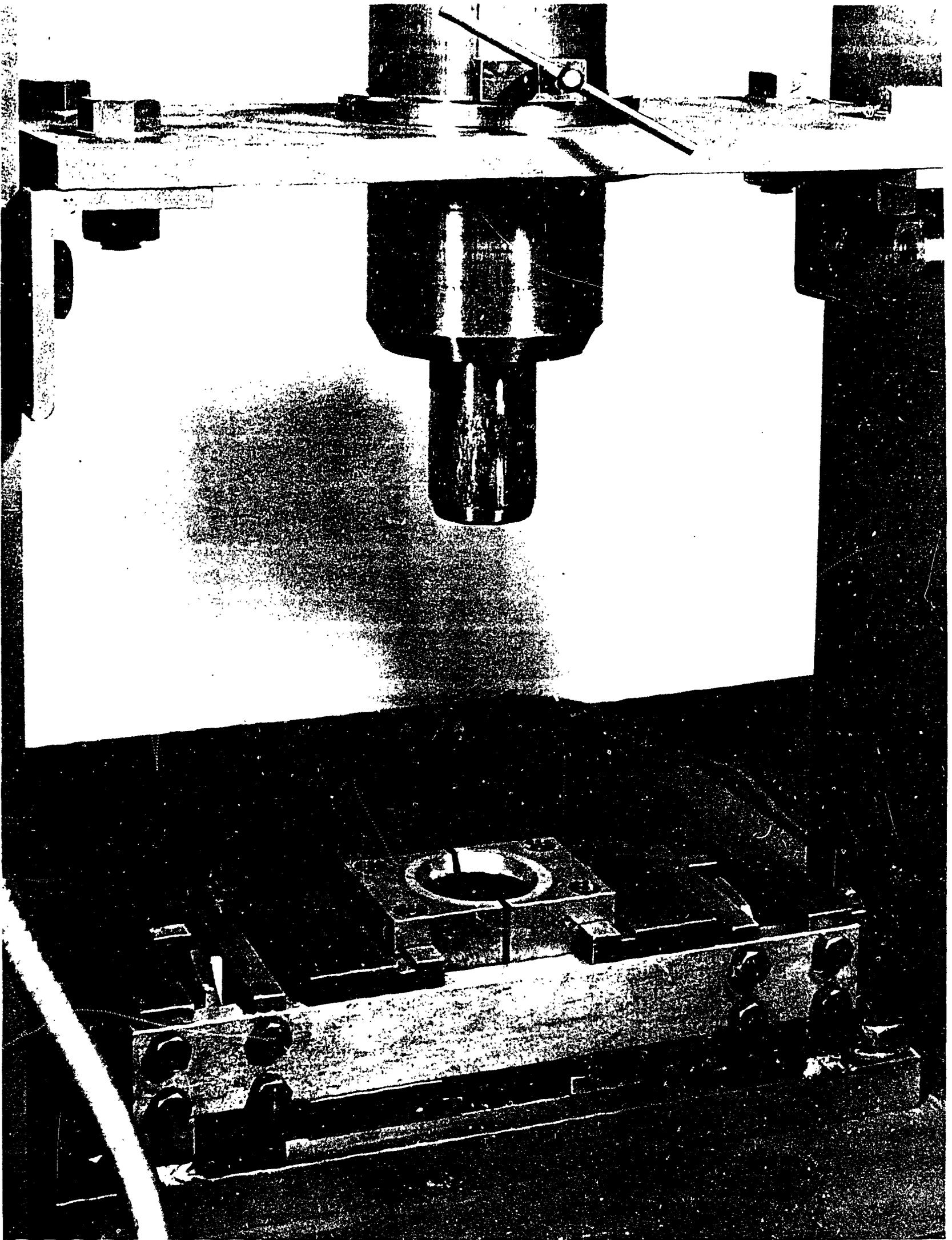


CIRCUIT C
Schéma de principe



MACHINE D'ESSAIS DE FREINAGE
VUE D'ENSEMBLE

Figure I 26



MACHINE D'ESSAIS DE FREINAGE
MACHOIRE

Figure I 27

II - ETUDES EXPERIMENTALES DE L'INSTALLATION DE REFROIDISSEMENT (Sodium et NaK)

Comme on l'a signalé plus haut, les essais des installations de refroidissement comportent la mise en service et le fonctionnement prolongé de deux réalisations figurant en vraie grandeur celles de Rapsodie (1 et 10 MW).

Auparavant, des essais partiels ont été effectués pour mettre au point ou étalonner les appareils, ou vérifier certaines conceptions de principe.

ETALONNAGE DES APPAREILS DE MESURE.

Dans le but d'obtenir sur les installations d'essais 1 et 10 MW des résultats les plus valables possibles, tous les appareils de mesures (débitmètres, sondes de niveau, capteurs de pression, thermocouples) ont subi des étalonnages aussi précis que possible. Nous les passons rapidement en revue ci-dessous

Etalonnage des débitmètres.

Il existe au total 28 débitmètres sur les deux installations (1 et 10 MW). Les quatre débitmètres principaux sont : sur l'installation 1 MW, un débitmètre primaire à double gaine de \varnothing 100/108 (débit nominal 35 m³/h) et un débitmètre secondaire de \varnothing 78/84 (débit nominal 48 m³/h) ; sur l'installation 10 MW, un débitmètre primaire à double gaine de \varnothing 200/208 (débit nominal 350 m³/h) et un débitmètre secondaire de \varnothing 200/208 (débit nominal 480 m³/h). Les débitmètres primaires mesurent des débits de sodium, les secondaires des débits de NaK. Les autres débitmètres sont de diamètre inférieur à 50 mm (débit inférieur à 16 m³/h).

La loi théorique qui régit le fonctionnement des débitmètres électromagnétiques permet d'en calculer avec une certaine approximation la caractéristique débit-force électromotrice. Toutefois les différences entre les conditions idéales de calcul et les réalités de la construction (valeur du champ magnétique, position des électrodes de mesure, effets d'extrémités) introduisent des écarts entre les résultats théoriques et expérimentaux (15 % environ au maximum).

Tous les débitmètres ont donc subi des étalonnages aussi précis que possible.

Débitmètres de diamètre inférieur ou égal à 50 mm
(débit inférieur à 16 m³/h)

L'étalonnage est effectué en mesurant le temps de passage d'une quantité connue de sodium à une température donnée. Le banc d'étalonnage utilisé est représenté schématiquement sur la figure II. 1. Une pompe électromagnétique fait passer le sodium, au travers du ou des débitmètres à étalonner, d'un réservoir R 1 à un réservoir R 2 posé sur une bascule. Des rouleaux placés sous le réservoir R 2, ainsi que des soufflets sur les tuyauteries (deux soufflets coaxiaux par sécurité) évitent l'effet des dilatations sur les indications de la bascule. Le fonctionnement de l'installation peut être manuel ou automatique. Chaque mesure est effectuée sur une masse de 150 kgs de sodium, la force électromotrice délivrée par le débitmètre étant enregistrée pour en obtenir une valeur moyenne. Avant toute opération, le sodium est mis en circulation à 300°C pendant une heure pour assurer un bon mouillage de la paroi du débitmètre (disparition des résistances de contact initiales entre sodium et parois).

Débitmètres de diamètre supérieur à 50 mm
(débit supérieur à 16 m³/h)

Il s'agit des débitmètres principaux de \varnothing 78, 100 et 200 mm. L'étalonnage est effectué au moyen d'étalonnages intermédiaires : débitmètre de \varnothing 50 pour étalonner ceux de \varnothing 78 et 100, débitmètre de \varnothing 100 pour étalonner ceux de \varnothing 200.

Le banc d'étalonnage est représenté schématiquement figure II. 2. Il comprend une canalisation au diamètre nominal 100 ou 200 avec deux débitmètres à étalonner D 1 et D 2. Le débitmètre étalon D E est placé en dérivation sur le débitmètre D 2. Les vannes V 1 et V 2 permettent de régler les débits dans les branches correspondantes. L'installation est complétée par une pompe, un réservoir de stockage et un réservoir d'expansion, qui peut être constitué par la pompe elle-même. Si D E est étalonné jusqu'à q m³/h, le fonctionnement de l'installation, V 1 fermée, permet d'étalonner D 1 jusqu'à q . En fermant V 2 et ouvrant V 1, on

étalonne D 2 jusqu'à q. Ouvrant à la fois V 1 et V 2 on étalonne ensuite D 1 jusqu'à 2 q. Fermant alors V 2 et ouvrant V 1, on étalonne D 2 jusqu'à 2 q. En répétant ces opérations, on voit qu'on peut étalonner D 1 et D 2 jusqu'à 3 q, puis jusqu'à 4 q, etc...

Deux bancs d'étalonnage ont été utilisés : pour les débitmètres \varnothing 78 et 100 (débits respectifs 48 et 35 m³/h), un circuit de sodium en tuyauteries de 100 mm, équipé d'une pompe à étanchéité par joint solidifié ; pour les débitmètres \varnothing 200 (débits 350 et 480 m³/h) un circuit de NaK en tuyauteries de 200 mm, qui n'est autre que la boucle d'essai de la pompe 480 m³/h dont il est question plus loin.

Les résultats expérimentaux montrent que les courbes d'étalonnage sont toutes linéaires dans le domaine d'utilisation des différents appareils (figure II.3). Ces courbes sont éventuellement corrigées, par le calcul, quand un débitmètre étalonné avec du sodium doit être utilisé sur du NaK, ou inversement. A titre indicatif, cette correction est de 1,63 % pour un débitmètre de \varnothing 100/104 dans le domaine 200 - 500°C, elle est de 0,83 % pour un débitmètre de \varnothing 200/204, dans le même domaine.

Les différentes erreurs commises sur les grandeurs mesurées ou utilisées pour le calcul permettent de dire que : les courbes d'étalonnage des débitmètres \varnothing 50 sont connues à $\pm 3,5$ % près ; celles des débitmètres \varnothing 78 et 100 à ± 5 % près, celles des débitmètres \varnothing 200 à $\pm 6,5$ % près.

Précisons qu'aucune force électromotrice parasite, due à un effet thermoélectrique n'a été mise en évidence ; toutes précautions sont prises à la construction pour éviter un tel effet parasite.

Il est important de noter d'autre part que la précision obtenue par étalonnage ne peut être maintenue que si le champ magnétique reste stable au cours du temps. Ce champ peut diminuer par vieillissement des aimants, ainsi qu'à la suite de chocs, ou d'élévation de température. Pour diminuer ces causes d'erreur :

- les aimants ont été choisis de qualité aussi bonne que possible pour ne présenter aucun effet de vieillissement.

- le champ magnétique dans l'entrefer a été mesuré au moment de l'étalonnage et sera vérifié périodiquement.

Ajoutons enfin que nous avons expérimenté des débitmètres de \varnothing 100 et 200 mm, utilisant non plus des aimants permanents, mais des électroaimants. Leur emploi sera envisagé concurremment aux appareils à aimant permanent.

Etalonnage des sondes de niveau continues

Quinze sondes continues existent sur les installations 1 et 10 MW, leur longueur utile variant de 1 à 2 mètres.

Ces sondes consistent essentiellement en tubes verticaux plongeant dans le métal liquide (figure II. 4). On mesure la résistance de la partie émergente du dispositif, qui varie linéairement avec le niveau. L'appareil est alimenté en courant continu par les bornes 1 et 3, et la mesure est effectuée entre les bornes 2 et 4. Une résistance de compensation permet de réduire considérablement les variations dues à la température.

L'étalonnage des appareils a été réalisé dans une cuve cylindrique verticale remplie de sodium, dont la température peut être fixée à toute valeur désirée grâce à une régulation, et dont le niveau est variable par remplissage (figure II. 5). Le repérage du niveau est obtenu à l'aide d'une électrode mobile, c'est-à-dire de longueur variable, alimentée sous tension alternative de 24 volts, et montée sur une traversée étanche et isolante électriquement. Le niveau est ainsi connu à ± 25 mm près. Une autre mesure du niveau est réalisée, pour vérification, au moyen d'une surpression d'argon appliquée par la vanne V 1 dans un tube vertical communiquant avec la cuve. La surpression d'argon mesurée avec précision par un manomètre à pétrole étalonné permet de connaître le niveau de sodium dans la cuve par rapport à celui du tube; ce dernier est constant dans toutes les mesures et déterminé au moyen d'une électrode de mesure fixe. La concordance entre les deux mesures est à 30 mm près.

Les étalonnages ont été effectués à 250, 400 et 500°C et ont permis de fixer la tension optimale d'alimentation à 3,5 volts. Les courbes d'étalonnage pour différentes températures sont des droites convergeant vers le point correspondant au niveau le plus élevé (figure II. 6). Si on utilise comme courbe d'étalonnage une droite unique, occupant la position moyenne des différentes droites obtenues, l'erreur qui en résulte, est nulle pour le niveau maximum; pour les niveaux moyens elle est de l'ordre $\pm 2,5$ cm ($\pm 4,5$ dans les cas extrêmes), avec un appareil dont la mesure s'étend sur 1,5 m.

Etalonnage des appareils de mesure de pression

Des appareils capables de mesurer des pressions sur du sodium à haute température ont été mis au point. Ils seront utilisés pour l'étude expérimentale des installations d'essais. Notons toutefois qu'aucune mesure de pression de sodium ou NaK n'est prévue sur les circuits de la pile.

L'appareil que nous avons développé est entièrement en acier inoxydable, et permet la mesure de pressions effectives ou différentielles de sodium liquide jusqu'à une température de l'ordre de 500°C (figure II. 7). La différence de pression à mesurer exerce sur une couronne circulaire une force qui est transmise selon les cas :

- à un élément dynamométrique (capsule déformable remplie de pétrole) relié par un capillaire de quelques mètres de longueur au manomètre indicateur.

- à un ressort annulaire de rappel dont la déformation est mesurée à l'aide d'un capteur électrique de déplacement, qui peut être relié à un appareil indicateur ou enregistreur (figure II. 8).

Nous avons plus particulièrement étudié ce dernier montage qui se prête bien à des transmissions à distance et qui sera utilisé sur les circuits d'essais de Rapsodie.

Dans tous les cas la déformation des soufflets est de l'ordre de 0,5 mm maximum. L'étude et l'étalonnage des capteurs ont été effectués au banc (figure II. 9) avec de l'alliage NaK. On a spécialement étudié :

- le gradient de température le long de la tige de transmission : le refroidissement dû aux ailettes et à la convection naturelle est suffisant pour la plupart des applications. Les soufflets étant à 300°C la température du transformateur différentiel est de 40°C pour une ambiance à 23°C.

- les frottements subis par la tige transmettant la poussée et l'hystérésis de l'ensemble soufflet-tige-anneau dynamométrique.

Une courbe d'étalonnage type correspondant à un appareil prévu pour l'intervalle de pression de 0 à 2 kg/cm² est représentée par la figure II. 10. La pression de référence était une pression d'argon mesurée à l'aide d'un manomètre étalon. La précision de la mesure est de l'ordre de ± 1 % dans la majeure partie de la plage de mesure.

Etalonnage des thermocouples .

Il n'a pas été jugé utile d'étalonner les thermocouples montés à demeure sur les installations et reliés en permanence au tableau de contrôle.

Toutefois des mesures plus fines seront faites au moyen de thermocouples étalonnés et mis en place au moment des essais thermiques. Leur étalonnage est effectué par des méthodes classiques. Ils permettent d'obtenir des indications à $\pm 0,5$ °C, cette erreur incluant celle de l'appareillage de mesure, et de lecture.

ETUDE EXPERIMENTALE DE L'ECHANGEUR INTERMEDIAIRE.

C'est un échangeur vertical à faisceau démontable, solidaire du bouchon de protection supérieur. Le fluide primaire (Na) circule de haut en bas dans la virole, le fluide secondaire (NaK) de bas en haut dans les tubes (figures II. 11 et II. 12).

Etude de l'écoulement. (1)

Dans le but de réaliser un appareil aussi efficace que possible du point de vue thermique et d'éviter toutes contraintes dues à des inégalités de température (en régime établi, mais surtout en régime transitoire), une étude expérimentale détaillée a été faite pour obtenir une répartition uniforme du sodium dans la virole, et du NaK dans les tubes.

Répartition du NaK à travers les tubes de l'échangeur

Le NaK descendant par une tuyauterie centrale de 200 mm de diamètre, est réparti dans les 888 tubes de \varnothing 12/14 par une chambre d'alimentation.

Les premiers essais ont permis de constater que le débit de NaK entrant dans la chambre donnerait naissance à un courant de recirculation schématisé sur la figure II. 13. On a alors construit une maquette à l'échelle 1 de la chambre de répartition, la perte de charge des tubes du faisceau étant représentée par des tubes de 5 mm de diamètre et de 20 mm de long. Les essais ont été conduits avec de l'air en respectant la similitude de Reynolds. La mesure des débits unitaires était effectuée suivant deux diamètres orthogonaux.

(1) Etude effectuée par la SOGREAH.

Le déséquilibre maximal des débits dans les tubes peut être caractérisé par :

$$\frac{\text{débit maximum} - \text{débit minimum}}{\text{débit moyen}}$$

Des déséquilibres de 20% ayant été constatés, des essais ultérieurs avec différents baffles ont conduit à retenir le suivant : une couronne d'environ 100 mm de longueur située à 110 mm de fond. Avec ce dispositif, le déséquilibre n'est que de 3 %.

Pertes de charge et répartition du sodium à l'entrée de l'échangeur.

L'arrivée du sodium autour du faisceau tubulaire est réalisée par une canalisation d'entrée et par une chemise cylindrique intérieure, percée d'une série de fenêtres rectangulaires.

L'étude hydraulique de ce dispositif a été réalisée au moyen d'un modèle à l'échelle 1/2 représentant la canalisation d'entrée, la virole extérieure et la chemise avec ses fenêtres. L'expérimentation a été conduite avec de l'eau. L'écoulement s'effectuant à niveau libre, par gravité, les débits dans le modèle ont été déterminés par la similitude de Froude. On a vérifié d'autre part que la perte de charge est une fonction quadratique de la vitesse.

L'expérimentation avait pour but de rendre minimal le déséquilibre de répartition des débits à travers les fenêtres, caractérisé par le rapport Q_{\max}/Q_{\min} , de la lumière la plus favorisée, à la lumière la plus défavorisée. On voulait aussi limiter à 320 mm de sodium la perte de charge à l'intérieur de l'appareil.

Des essais préliminaires avec 12 fenêtres de 100 x 50 mm donnèrent un déséquilibre Q_{\max}/Q_{\min} de 1,35, et une perte de charge prohibitive. Une section totale des fenêtres de 1920 cm² permet de ramener la perte de charge à une valeur acceptable, mais le déséquilibre était de l'ordre de $Q_{\max}/Q_{\min} = 4$ (le liquide entrant dans l'espace annulaire par la conduite d'entrée était réfléchi contre la paroi opposée de la virole d'où il résultait une entrée préférentielle dans les fenêtres diamétralement opposées à l'entrée). Des essais systématiques conduisirent alors à disposer des chicanes radiales de longueur différente entre les fenêtres successives (figure II. 14) ce qui permet de réduire le déséquilibre Q_{\max}/Q_{\min} à 1,19, soit un écart maximum d'environ 10 % autour de la valeur moyenne. Il en résulte en même temps une surface libre extrêmement tranquille.

La section totale de 1920 cm² a été obtenue en adoptant 8 fenêtres de 120 x 200 mm. La perte de charge relative au passage du sodium à travers ces fenêtres est de 110 mm de sodium pour le débit nominal (350 m³/h.). Entre l'entrée de l'échangeur et le niveau libre dans l'espace annulaire, elle est de 300 mm de Na. Entre le niveau libre dans l'espace annulaire et la sortie, elle est de 250 mm de Na.

Répartition des vitesses à l'extérieur du faisceau tubulaire.

L'introduction du sodium à l'extérieur du faisceau tubulaire à travers les fenêtres d'admission a lieu à la périphérie du faisceau. Il y avait lieu d'examiner la répartition du débit entre les tubes sur une certaine longueur du faisceau pour en vérifier l'uniformité.

L'étude sur modèle à l'eau a permis de conclure qu'une répartition uniforme des vitesses de sodium entre les tubes du faisceau est atteinte à environ 260 mm en dessous de l'axe médian des fenêtres d'admission. Ce résultat reste valable en créant une alimentation déséquilibrée de 10 % autour de la valeur moyenne aux fenêtres d'admission.

Vibrations des tubes.

Entre autres causes possibles d'excitation de vibrations, il faut retenir les excitations hydrodynamiques dues à l'écoulement transversal par rapport aux tubes. Le calcul montre que la fréquence des forces alternées est de 15 Hz pour le débit nominal. Les débits pouvant varier de 0 à 350 m³/h, la fréquence d'excitation peut donc varier de 0 à 15 Hz environ, or la fréquence propre des éléments est d'environ 6 Hz. Il était donc indispensable de disposer des appuis intermédiaires.

Deux séries de ceintures (figure II.11) ont donc été placées pour augmenter les fréquences propres des tubes qui se trouvent ainsi portées à 37 Hz. Ces supports ont d'autre part, la propriété de diminuer les déformations latérales qui pourraient résulter de la dilatation des tubes sans supprimer l'effet des lyres de dilatation, c'est-à-dire sans augmentation sensible des contraintes locales.

ETUDE THERMIQUE DES PIEGES FROIDS

Les pièges froids prévus sur les circuits de Rapsodie sont des réservoirs cylindriques, remplis de laine d'acier inoxydable, et refroidis par des serpentins d'azote. Le sodium (ou NaK) circule de bas en haut à l'intérieur, puis remonte dans l'espace annulaire extérieur (figure II. 15).

La répartition des températures le long du trajet du sodium étant très importante pour le bon fonctionnement et la durée de vie du piège, une étude thermique a été entreprise en montant un tel piège froid sur un petit circuit de NaK. Au cours de cet essai, le fluide de refroidissement dans le serpentin était de l'air.

Les résultats obtenus sont représentés sur la figure II.16. On voit que le métal liquide se refroidit essentiellement au cours de son passage de haut en bas à l'intérieur du piège, le passage dans l'espace annulaire extérieur étant à peu près isotherme. Enfin un léger réchauffement a lieu avant l'entrée du fluide dans le tuyau de sortie.

Ces résultats peuvent s'expliquer par les considérations suivantes :

- le métal liquide (statique) situé entre les deux chemises qui enferment les serpentins assure par conduction et convection naturelle une transmission de chaleur entre le métal liquide descendant et le métal liquide ascendant. Cette transmission de chaleur supprimerait tout refroidissement du sodium dans l'espace annulaire extérieur. Par ailleurs, le bourrage de laine inoxydable étant placé essentiellement contre la chemise des serpentins, le métal liquide peut suivre préférentiellement un chemin proche de la paroi du réservoir, et rester ainsi isotherme pendant son trajet ascendant.

- le léger réchauffement du métal liquide avant la sortie est provoqué par l'échange de chaleur direct entre le fluide entrant et le fluide sortant, à la partie supérieure de l'appareil.

On peut donc espérer, avec ce dispositif, d'une part disposer d'une zone isotherme de capacité suffisamment grande pour favoriser le dépôt des oxydes, d'autre part avoir des températures aux tuyauteries d'entrée et de sortie qui évitent tout bouchage intempestif des canalisations.

ESSAIS DES POMPES MECANIQUES

Ce sont des pompes centrifuges , à arbre vertical , l'étanchéité sur l'arbre étant réalisée par une garniture mécanique à bain d'huile (figures II. 17 et II. 18). La vitesse de rotation est réglable grâce au moteur d'entraînement : c'est un moteur asynchrone à cage alimenté en fréquence et tension variables par un groupe convertisseur (un moteur asynchrone à vitesse variable entraînant un alternateur).

Essais hydrauliques. (1)

On a vérifié avant de construire les pompes primaires que leur fonctionnement était hydrauliquement bon , et en particulier ne risquait pas de s'accompagner d'entraînement du gaz dans le liquide. La pompe peut en effet , suivant son régime de marche , fonctionner avec des niveaux très différents de sodium (1200 mm entre le niveau à l'arrêt et le niveau à régime maximum). On a voulu obtenir que :

1° - pour tous les niveaux possibles dans la virole de la pompe il n'y ait aucune formation de vortex ; induit soit par l'aspiration même de la pompe , soit par l'arbre tournant.

2° - chacun des canaux formés par les aubes du diffuseur d'entrée soit alimenté correctement et de façon uniforme.

A cet effet des essais à l'eau ont été effectués sur une maquette à l'échelle 1/2 représentant l'ensemble de la virole avec son tuyau d'alimentation , l'arbre tournant , et le diffuseur d'entrée. Il n'y avait pas de pompage , la circulation étant réalisée par une pompe auxiliaire capable du débit nominal (compte tenu de l'échelle de la maquette). Grâce à des parties transparentes en plexiglas on pouvait observer l'écoulement dans le diffuseur et à la sortie de celui-ci (entrée dans la roue de la pompe). Des visualisations de l'écoulement ont été réalisées ainsi que des observations du gaz entraîné. On a observé :

- une surface libre très agitée au voisinage du tuyau d'alimentation de la virole.

- une répartition très inégale et instable des canaux du diffuseur.

- des entrainements importants de gaz dûs à un vortex central et à l'agitation de la surface libre du liquide.

(1) Effectués par la SOGREAH.

On a remédié à ces défauts par quelques dispositifs déterminés empiriquement (figure II.17) :

- Des réflecteurs horizontaux qui tranquillisent la surface libre au voisinage de l'alimentation.
- Une gaine intérieure supprimant tout vortex.
- Une couronne de tranquillisation qui stabilise l'écoulement dans le diffuseur d'entrée.
- Une plaque verticale dans la chambre d'aspiration qui évite tout mouvement tourbillonnaire dans cette chambre.

Essais au sodium (ou NaK) .

Avant de monter les quatre pompes mécaniques (deux pompes primaires et deux pompes secondaires) sur les installations complètes 1 et 10 MW, quatre circuits individuels ont été réalisés à Fontenay-aux-Roses pour effectuer des essais préliminaires et s'assurer du fonctionnement correct des appareils.

Aucun essai à l'eau préalable n'a été effectué; les pompes, dès leur achèvement de fabrication (par les Sociétés Hispano Suiza et Pfyffer) ont été installées sur leur circuit d'essai individuel. Elles ont été essayées au sodium pour les pompes primaires, au NaK pour les pompes secondaires dans les conditions de marche les plus sévères prévues et même au-delà : chaque pompe a été testée à 550°C.

Nous donnons ci-dessous une description sommaire des circuits d'essais :

La virole de la pompe est accrochée par sa bride supérieure à une tour métallique (6 ou 9 mètres de haut). Dans le cas de pompe primaire la plate-forme supérieure de cette tour représenterait le dessus de la dalle de protection des circuits primaires de la pile.

Le circuit (figure II.19) est réalisé en tuyauteries d'acier inoxydable de diamètre 100 mm pour les pompes de l'installation 1 MW, 200 mm pour les pompes de l'installation 10 MW. Chaque boucle est équipée d'un débitmètre électromagnétique, d'une vanne à soufflet pour faire varier la perte de charge du circuit et d'un manomètre différentiel pour mesurer la pression fournie par la pompe.

Des réchauffeurs électriques et des réfrigérants à air ou à eau permettent de stabiliser la température du métal liquide à toute valeur choisie entre 150 et 550°C. Un réservoir de stockage (2 ou 3 m³) associé au circuit permet le remplissage et la vidange à chaud si nécessaire. Le niveau de métal liquide dans la virole de la pompe est mesuré à l'aide des deux sondes de niveau continu liées au bouchon supérieur.

Les circuits des deux pompes primaires (35 et 350 m³/h) sont montés avec le même système de double enveloppe prévu pour les circuits primaires de Rapsodie. Ces doubles enveloppes constituent une enceinte de sécurité, et sont d'autre part utilisées pour le préchauffage de l'installation par circulation d'azote à 250°C (sur les circuits d'essais le préchauffage était réalisé par de l'air chaud).

La boucle d'essai de la pompe 480 m³/h a été par ailleurs utilisée pour l'étabonnage des débitmètres principaux de l'installation 10 MW. Un arrangement spécial a été prévu dans ce but, comme on l'a précisé par ailleurs.

Actuellement les tests des quatre pompes mécaniques sur ces boucles d'essais préliminaires sont pratiquement achevés. Ils se sont déroulés de la mi-juin au début d'octobre 1961. Ces essais ont été dans l'ensemble très satisfaisants. On doit toutefois noter que sur la pompe 48 m³/h on a dû retoucher le jeu du palier fluide à la suite d'un coincement survenu à 300°C après 25 heures de fonctionnement (le jeu a été porté de 150 à 200 microns). Un phénomène identique s'est produit sur la pompe 35 m³/h. On a pu y remédier en élevant le niveau de sodium et en effectuant une montée en température avant mise en marche de la pompe. Ces défauts semblent donc dûs à une mauvaise stabilisation de certaines pièces avant mise en marche, d'où il est résulté des déformations pendant la montée en température. Les deux autres pompes n'ont eu aucun incident. Mise à part la pompe 350 m³/h dont les essais sont encore en cours et qui a environ 100 heures de marche au moment de la rédaction de cette note, les trois autres pompes ont eu des durées d'essais allant de 280 à 450 heures à température et régime variables.

Les résultats d'essais suivants ont été obtenus :

- On a tracé les courbes caractéristiques de chaque pompe pour les différents régimes possibles (voir à titre d'exemple la figure II. 20).

- Aucune trace de fuite d'huile n'a été observée aux garnitures mécaniques, ni aucune usure décelée sur la garniture elle-même (cette dernière observation n'a pu être faite que sur la première pompe, la seule actuellement démontée après ces essais). La température de l'huile s'est maintenue dans tous les cas à une valeur inférieure à 75°C. Dans le cas des pompes 480 et 350 m³/h aucun refroidissement forcé de l'huile n'a été nécessaire.

- La température à la base des bouchons de fermeture n'a pas dépassé 100°C pour les pompes secondaires et 300°C pour les pompes primaires. La face supérieure des bouchons est restée à une température de 60 à 70°C. Le refroidissement des bouchons des pompes primaires n'a pas été nécessaire, toutefois le problème sera réexaminé quand les bouchons auront leur remplissage de protection.

- Le palier fluide observé sur la seule pompe actuellement démontée ne montre aucune trace d'usure malgré des fonctionnements prolongés à basse vitesse, de nombreux démarrages et des mises en route très progressives du moteur.

- L'entraînement des pompes par un moteur à tension et fréquence variables a donné toute satisfaction. Le rapport des vitesses obtenues est 7 environ (140 à 1000 tours/minute).

- Une injection d'argon avait été prévue le long de l'arbre de la pompe pour éviter une remontée des vapeurs de Na ou de NaK. Cette injection d'argon n'a pas été utilisée au cours des essais et il semble qu'elle ne sera pas indispensable. Toutefois des essais plus prolongés peuvent seuls permettre de conclure de façon catégorique.

- Le préchauffage des circuits d'essais des pompes primaires par circulation d'air chaud dans les doubles enveloppes a été totalement satisfaisant.

D'autres essais seront effectués sur les pompes quand elles seront définitivement placées sur les installations 1 et 10 MW.
En particulier :

- Le moteur actuellement utilisé est un moteur étanche à titre de simple précaution puisque l'étanchéité sur le gaz de couverture est réalisée par une garniture mécanique. On procédera à des essais avec un moteur classique non étanche que l'on pense devoir être satisfaisant.

- Une autre variante d'étanchéité sera mise à l'essai : la pompe sera montée avec son moteur étanche avec interposition sur l'arbre d'un joint tournant garni de NaK (figure II.21). Dans ce dispositif, l'atmosphère supérieure et l'atmosphère inférieure communiquent par l'intermédiaire de ce joint de NaK formant soupape, qui constitue un piège pour les vapeurs de métal liquide et évite qu'elles atteignent le moteur.

Des essais préliminaires sur ce type de joint ont permis de mettre au point une forme correcte des pièces tournantes et fixes pour qu'elles puissent supporter des variations brusques de pression du côté du moteur aussi bien que du côté de la pompe, sans provoquer d'entraînement brutal du liquide du joint. Un joint de même type a d'ailleurs été utilisé sur une pompe en fonctionnement depuis plusieurs années et a permis de vérifier qu'il piègeait efficacement toute vapeur.

- On vérifiera d'une façon plus approfondie les températures aux différents points du bouchon de protection des pompes primaires, en particulier au voisinage du joint torique et de la garniture mécanique. On déterminera si un refroidissement est indispensable quand ces bouchons sont remplis de leur grenaille de protection.

ESSAIS DES POMPES ELECTROMAGNETIQUES.

Pompes électromagnétique à induction .

Ce sont les pompes prévues pour être interchangeables avec les pompes mécaniques principales des circuits (figure II.22).

Essais hydrauliques

De telles pompes peuvent être sujettes à des phénomènes de cavitation. Aussi une étude hydraulique du conduit a-t-elle été effectuée, qui a portée sur les trois points suivants :

- forme d'entrée
- cavitation dans la pièce de retour (partie supérieure du conduit de la pompe)
- pertes de charge.

Ces essais ont permis de préciser une forme d'entrée évitant tout décollement de fluide par suppression du bord d'attaque, et de conclure à l'absence de tout risque de cavitation avec le profil proposé pour la pièce de retour. Les pertes de charge internes à la pompe ont été trouvées égales à 0,650 kg/cm² pour le débit nominal de 35 m³/h.

Essais au sodium ou NaK

Des essais des deux pompes réalisées (Na 35 m³/h ; NaK 48 m³/h) vont être effectués sur deux circuits identiques à ceux décrits pour les pompes mécaniques. Les essais de la première de ces pompes sont prêts à débiter.

Pompe électromagnétique du réservoir de trop-plein.

C'est une petite pompe à courant continu, alimentée par un redresseur (6000 A, 1,5 V) pour obtenir un débit de 5 m³/h sous 1 kg/cm² (figures II.23 et II.24). Elle doit alimenter les circuits de purification.

Ses essais vont être réalisés sur un circuit qui fait partie de l'installation décrite pour l'étalonnage des sondes de niveau (figure II.5). La pompe est logée dans le fond d'une cuve représentant le réservoir de trop-plein de la pile. Un circuit en tuyauteries de \varnothing 30/33 raccordé à la partie inférieure de la cuve, comporte une vanne de réglage, un débitmètre et un manomètre différentiels, qui permettront de tracer les caractéristiques de la pompe.

ESSAIS SUR LES ENSEMBLES COMPLETS 1 ET 10 MW.

Ces ensembles représentent en vraie grandeur les installations thermiques prévues pour Rapsodie (figure II.25). Les différences suivantes sont à noter :

- La pile est remplacée thermiquement sur ces maquettes par un réchauffeur fonctionnant au mazout. Chaque installation est donc équipée d'un tel réchauffeur, de puissance respective 1 et 10 MW. Ces réchauffeurs, celui de 10 MW en particulier constituent en eux-mêmes une réalisation importante. Nous n'insisterons toutefois pas sur leur description puisqu'ils ne sont qu'un élément annexe dans les essais poursuivis. Notons cependant que le réchauffeur 1 MW est constitué par une chambre cylindrique autour de laquelle les tuyaux de sodium sont enroulés en serpentins. La chaleur est transmise au sodium essentiellement par rayonnement. Le réchauffeur 10 MW possède une chambre parallélépipédique où le chauffage du sodium a lieu par rayonnement ; au-dessous se trouve une autre chambre traversée par les fumées qui transmettent

leur chaleur au sodium par convection. Les fumées passent ensuite dans un réchauffeur d'air où elles réchauffent l'air de combustion du mazout.

- la cuve de la pile a été remplacée par un réservoir dit réservoir principal placé à la sortie du réchauffeur, et dont la capacité est sensiblement égale à celle de la pile."

- la disposition respective des différents éléments a été respectée dans l'installation 1 MW. Dans l'installation 10 MW, elle n'a pu l'être pour des raisons d'encombrement en hauteur et de possibilités pratiques : par exemple l'échangeur terminal NaK-air a été ramené au niveau du sol, alors que dans l'installation de la pile, tout le circuit secondaire est disposé plus haut que le circuit primaire.

La figure II.26 rappelle de façon très simplifiée le schéma d'ensemble des circuits.

Ces installations permettront essentiellement d'effectuer les tests globaux qui ne peuvent être faits sur des éléments pris individuellement. Nous donnons ci-dessous une liste très succincte des essais envisagés :

- Préchauffage (par azote à 250° C). On étudiera : l'uniformité du préchauffage des différents tronçons des circuits, et l'alimentation en parallèle de ces tronçons, le réglage de la température et des débits d'azote, le temps de préchauffage de l'ensemble.

- Remplissage. On mettra au point les opérations de remplissage qui sont délicates, étant donnée la complexité de l'installation (manoeuvres à effectuer sur le sodium et l'argon, fonctionnement des événements).

- Vidange. Les opérations prévoient la vidange possible du circuit primaire sans vidanger la pile, de même que l'inverse. On mettra au point le tube casse-siphon destiné à permettre ces opérations. On s'assurera de l'efficacité des dispositifs prévus pour éviter des vidanges intempestives (tuyauteries avec vannes et sodium gelé), et des manoeuvres à effectuer sur ces tuyauteries pour faire une vidange (réchauffage du sodium gelé).

- Démontage. La mise au point des opérations de démontage des pompes et échangeurs primaires est prévue. Le démontage sera effectué dans des chemises en plastique, et le système transposé au cas où le sodium serait radioactif. Une virole de nettoyage sera installée pour effectuer une décontamination de ces appareils souillés de sodium supposé actif.

- Circuit d'argon. La régulation de pression (alimentation par ouverture d'une vanne et détente, rejet par un compresseur) sera mise au point, ainsi que les pièges à vapeur de sodium, destinés à éviter toute condensation ou bouchage dans les circuits d'argon.

- Pompes principales. Les essais seront poursuivis sur les pompes mécaniques comme on l'a explicité plus haut. On étudiera spécialement l'endurance des différents éléments de ces appareils.

On expérimentera la solution des pompes électromagnétiques substituées aux pompes mécaniques.

- Echangeurs intermédiaire et terminal. Les mesures de température et de débits permettront d'étudier dans toutes les conditions les performances et le comportement des échangeurs. Des thermocouples intérieurs à l'échangeur intermédiaire donneront des renseignements sur l'homogénéité thermique de l'appareil en régime permanent ou transitoire ; grâce à ces renseignements on pourra recouper les études hydrauliques faites sur maquette.

- Niveaux libres. Les appareils de mesure de niveau et de prise de pression doivent permettre une étude précise du comportement hydraulique de l'ensemble en régime établi, pour différents niveaux de marche, et en régime transitoire (pertes de charge, position respective des niveaux, oscillations des niveaux et variation du débit en cas d'arrêt des pompes, etc...).

- Convection naturelle. Des études expérimentales seront faites sur l'installation 1 MW pour être transposées au circuit de la pile.

- Circuit de purification. Ces circuits sont assez complexes et exigeront une étude précise de leurs différents éléments. Indiquons sans autre détail que les points importants sont : les pièges froids, les pièges chauds, les procédés de contrôle de la teneur en oxygène (indicateurs de bouchage, ou autres). Après introduction volontaire et connue d'oxygène dans les circuits, on étudiera la cinétique de la purification. On mettra au point les dispositifs de prélèvement et d'analyse chimique valables pour les circuits primaires de la pile (sodium supposé actif).

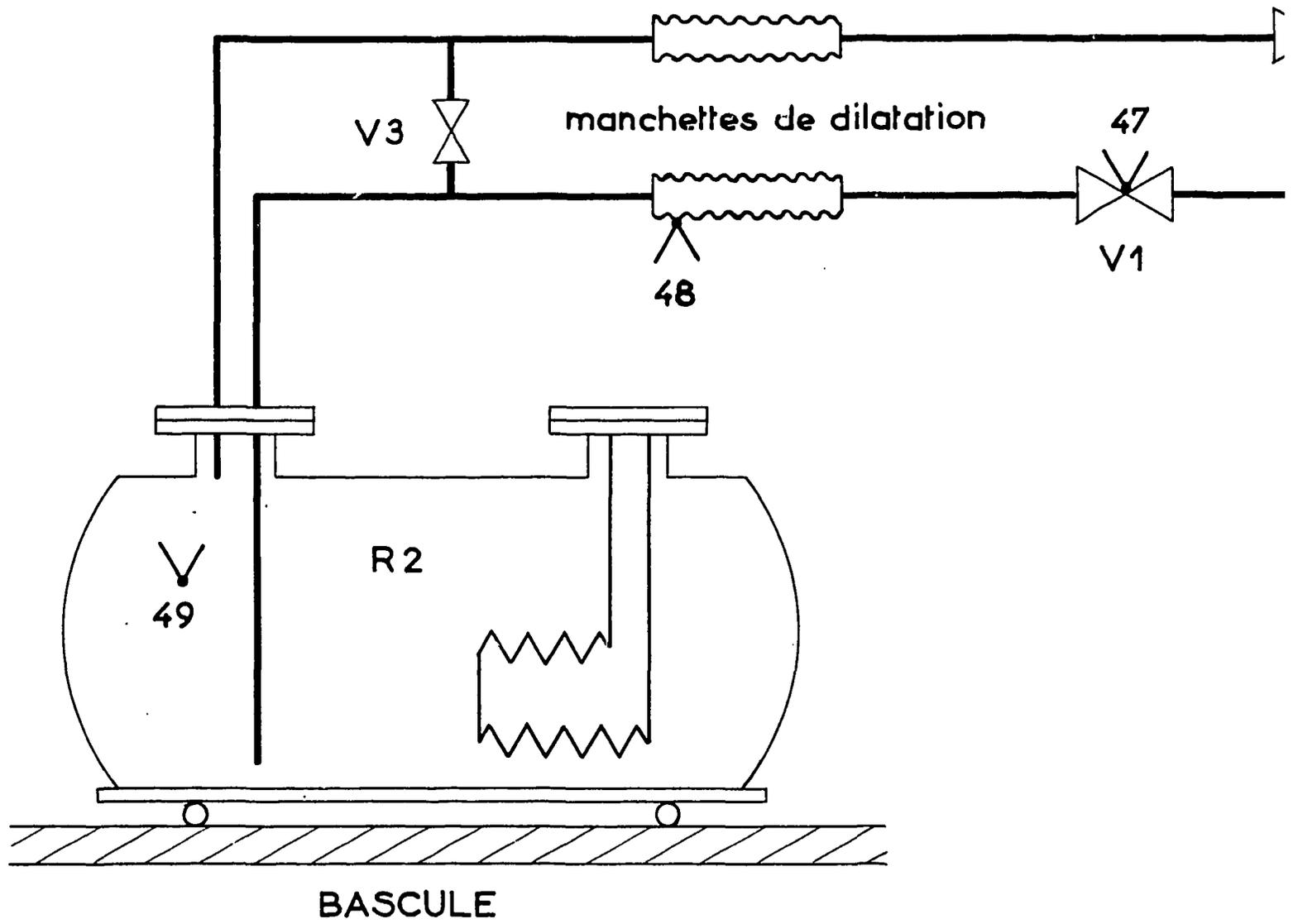
- Tableaux de contrôle. Chacune des installations 1 et 10 MW est dotée d'un important tableau de contrôle, qui constitue lui-même un banc d'essai pour la pile. En particulier, on a utilisé comme cela est prévu pour Rapsodie, le maximum d'éléments statiques, c'est-à-dire qu'on a fait appel dans la majorité des cas à des circuits logiques composés de semi-conducteurs ou à des amplificateurs magnétiques. Les principaux éléments spécialement étudiés dans cette optique sont :

- a) les circuits de logique et sécurité (autorisation de démarrage, alarmes, arrêts automatiques).
- b) les mesures de niveaux discontinus
- c) les détections de fuites
 - des tuyauteries et appareils
 - des vannes.
- d) le centralisateur de mesure.

Enfin, l'exploitation des tableaux de contrôle jointe à celle des circuits permettra, après expérience, de définir au mieux la conception des tableaux des circuits de Rapsodie.

o o o o

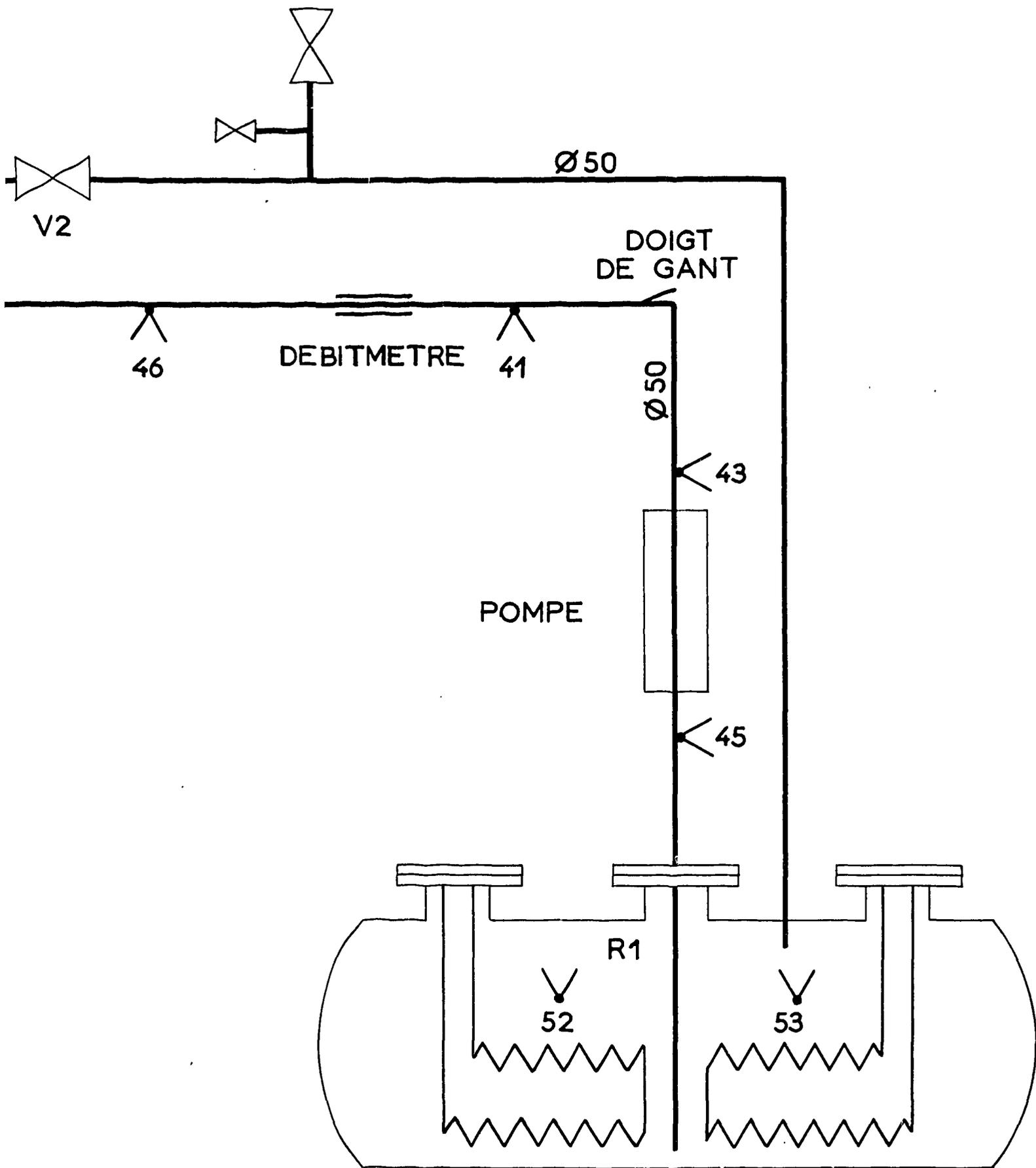
Précisons pour terminer que les installations d'essai 1 et 10 MW dont il vient d'être question sont en achèvement de réalisation à Cadarache. Les deux installations doivent être en fonctionnement en janvier prochain.



∇ Thermo-couple

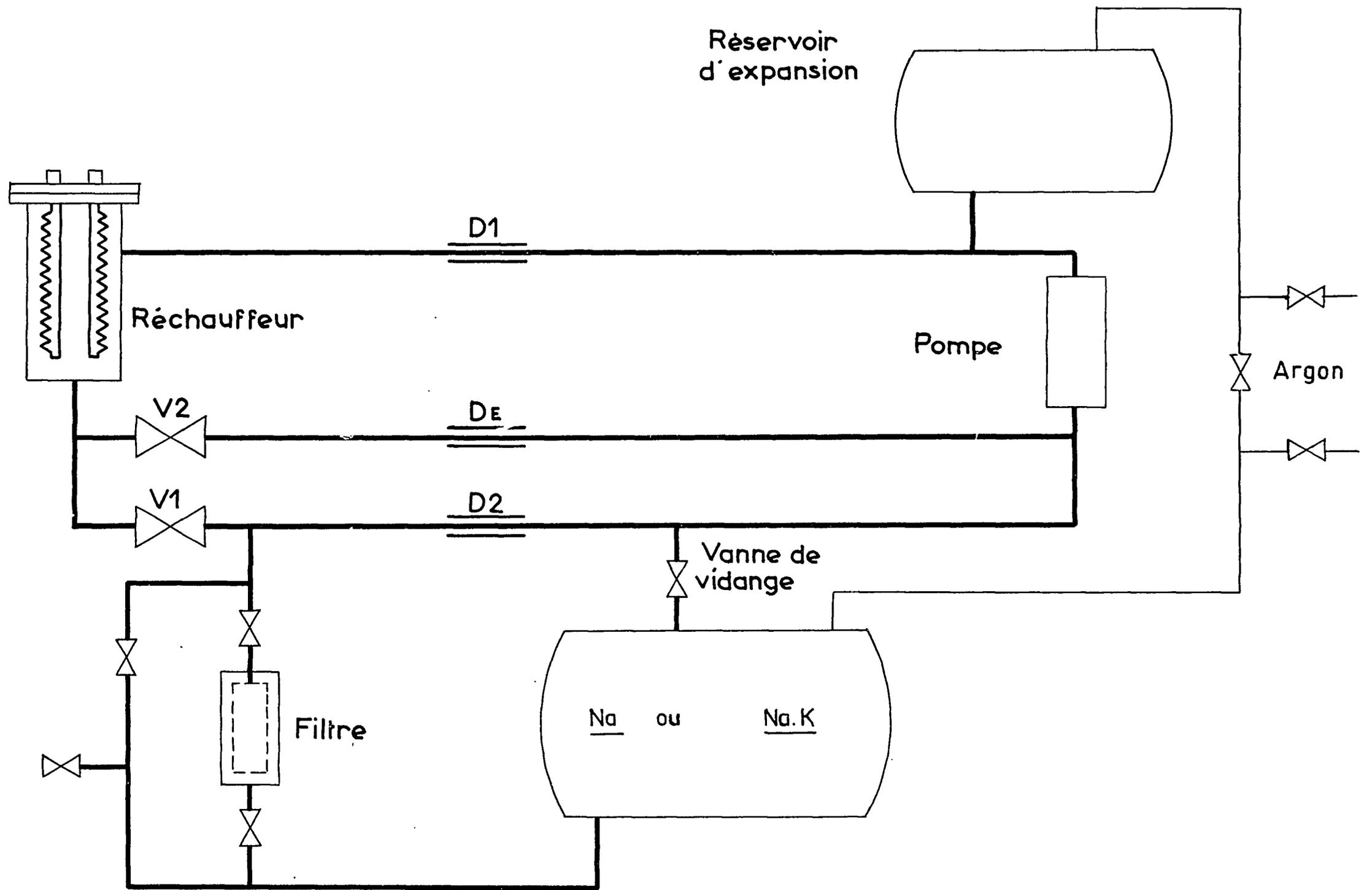
41,42.... n° de la voie de l'indicateur M.E.C.I.

SCHEMA ETALONNAGE

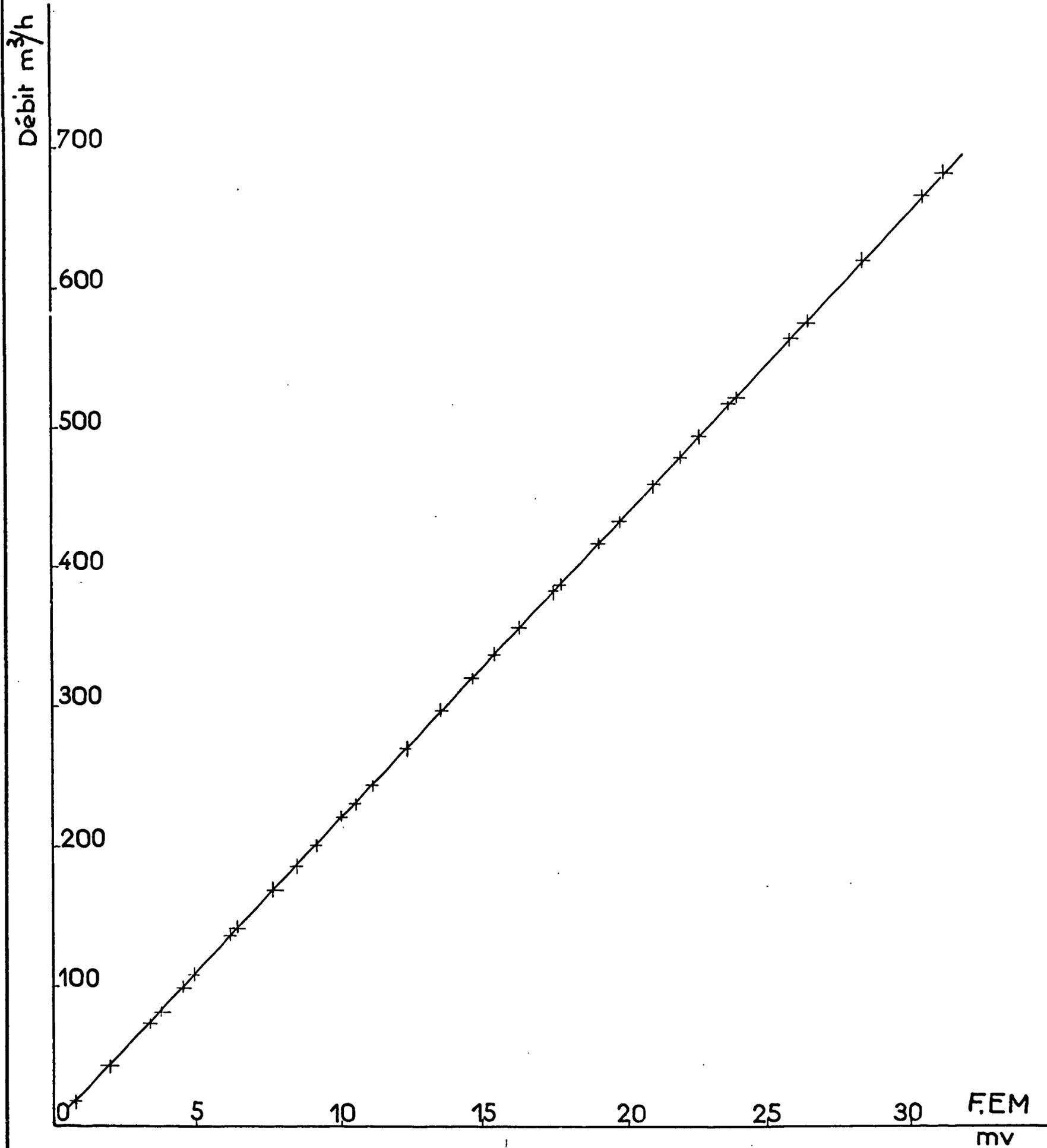


E DEBITMETRE $\phi 50$

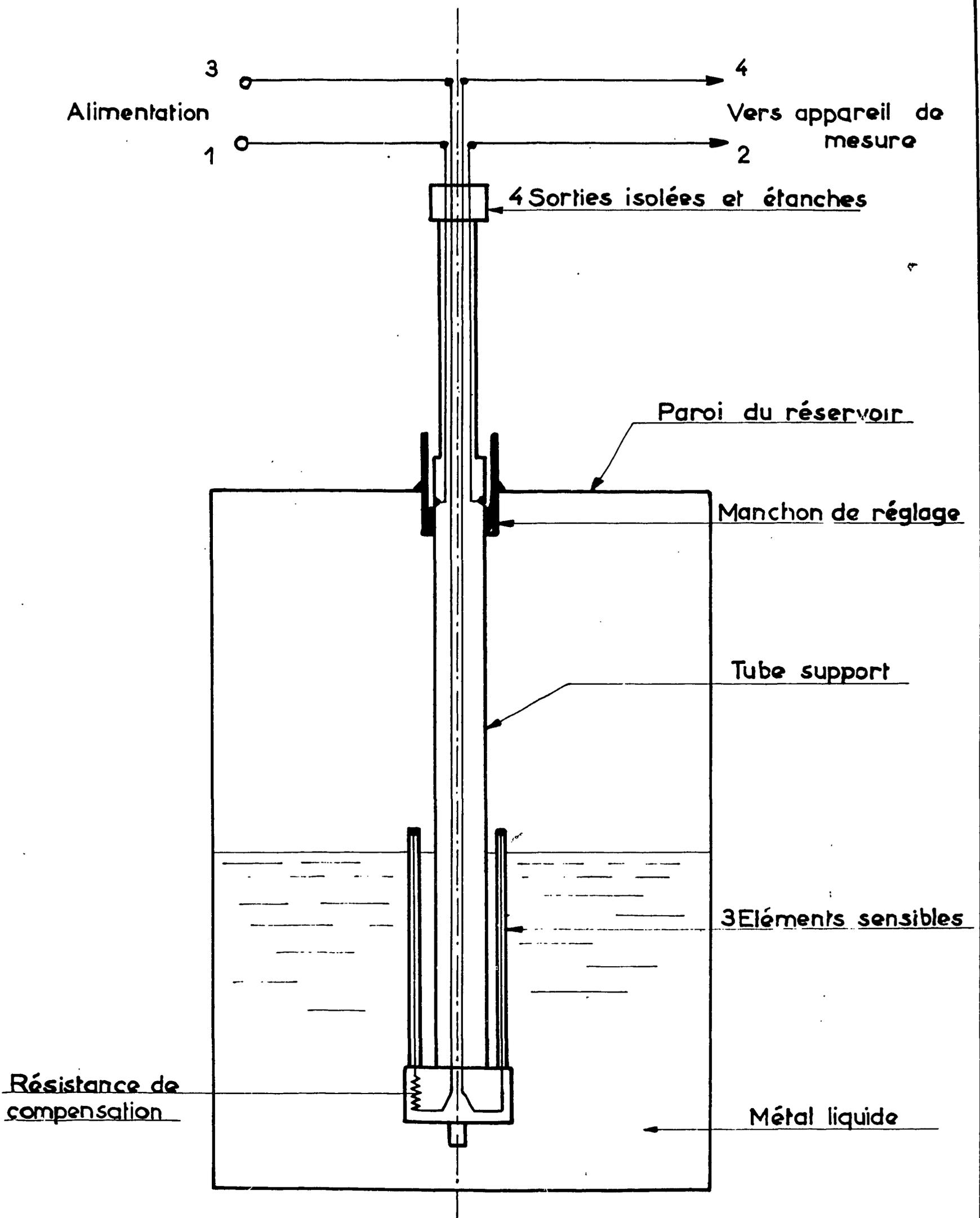
FIGURE II.1



CIRCUITS D'ÉTALONNAGE POUR DÉBITMÈTRES
 Ø 100 ET Ø 200

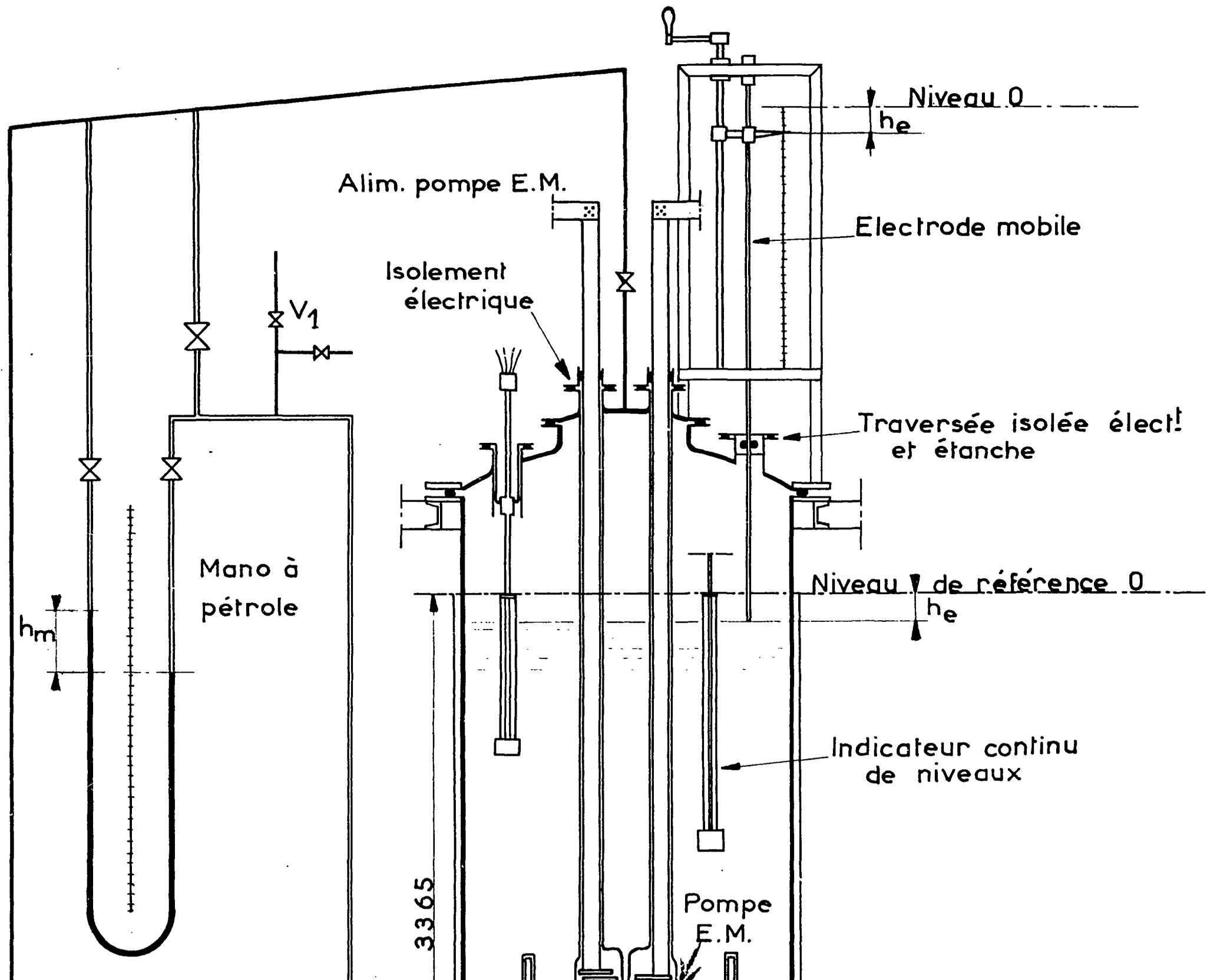


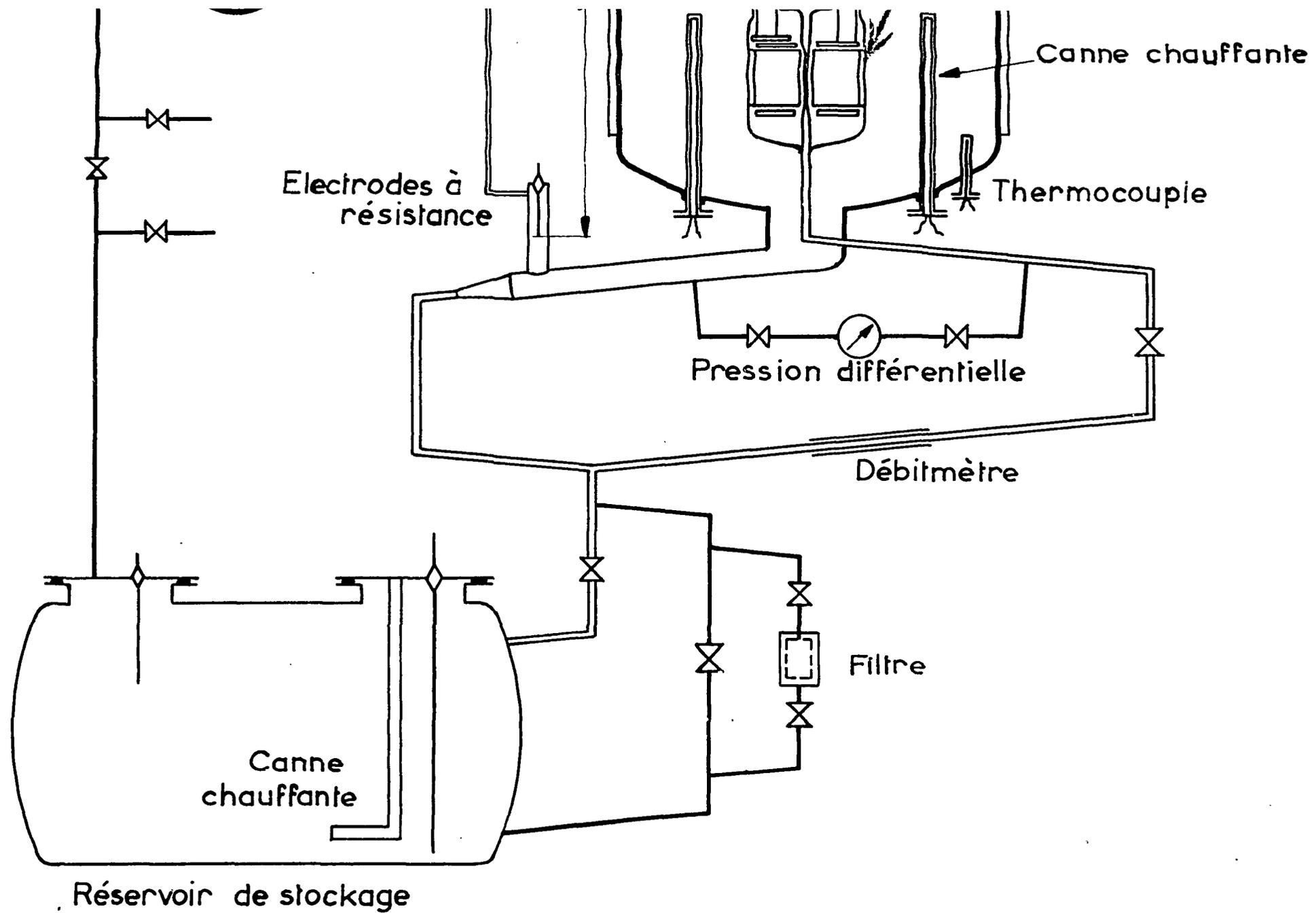
DÉBITMÈTRE Ø 200 10 DNK 01
Etalonnage à 430°C FIGURE - II 3



SONDE DE NIVEAU CONTINU

FIGURE II.4





CUVE D'ÉTALONNAGE D'INDICATEURS CONTINUS DE NIVEAUX ET CIRCUIT D'ESSAIS DE LA POMPE ÉLECTRO_MAGNÉTIQUE DU TROP PLEIN

INDICATEUR CONTINU DE NIVEAUX

1 N Na 04

Tension d'alimentation 3,5 v

mm.

0

500

1000

1500

550 °C

400 °C

250 °C

FIGURE II 6

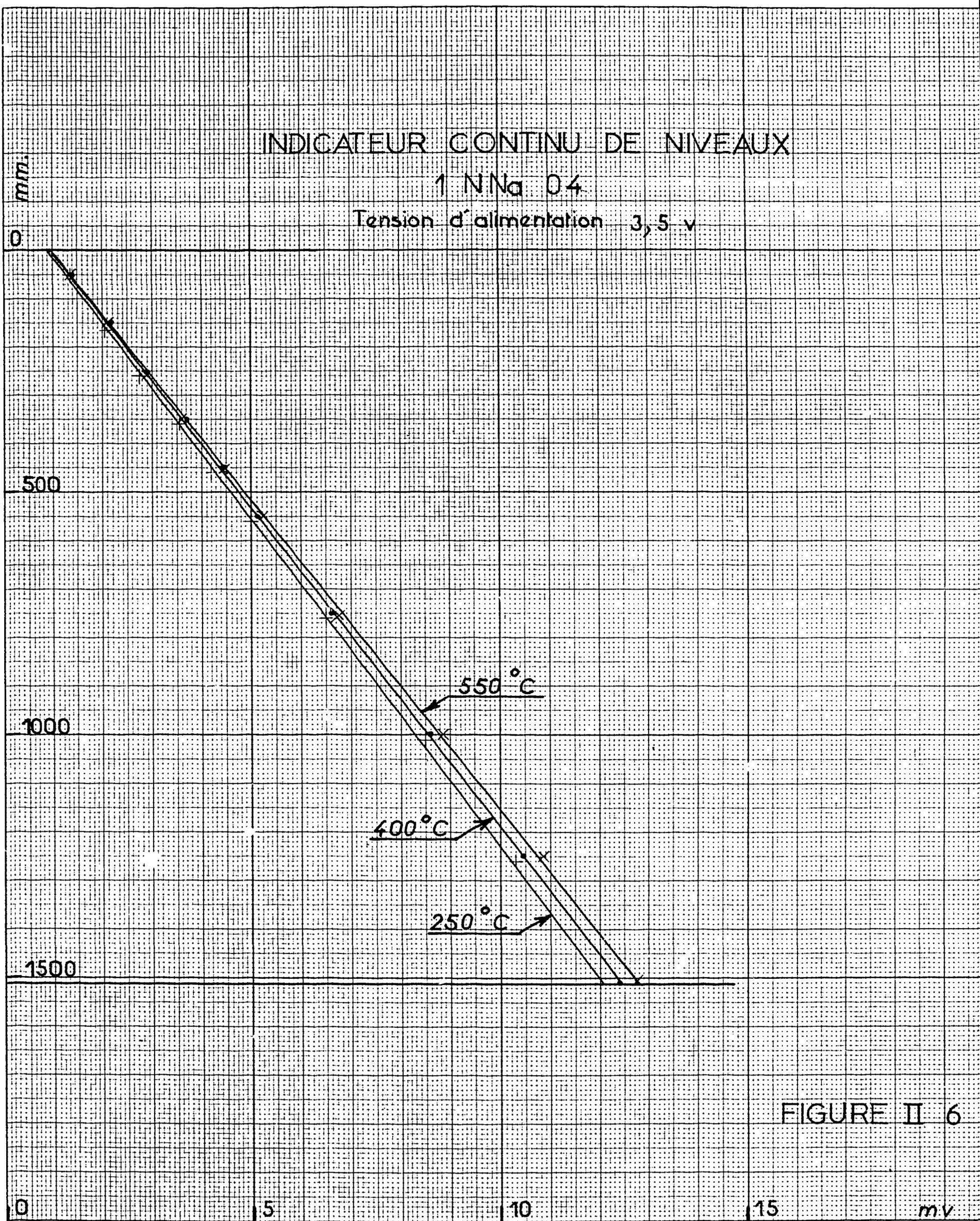
0

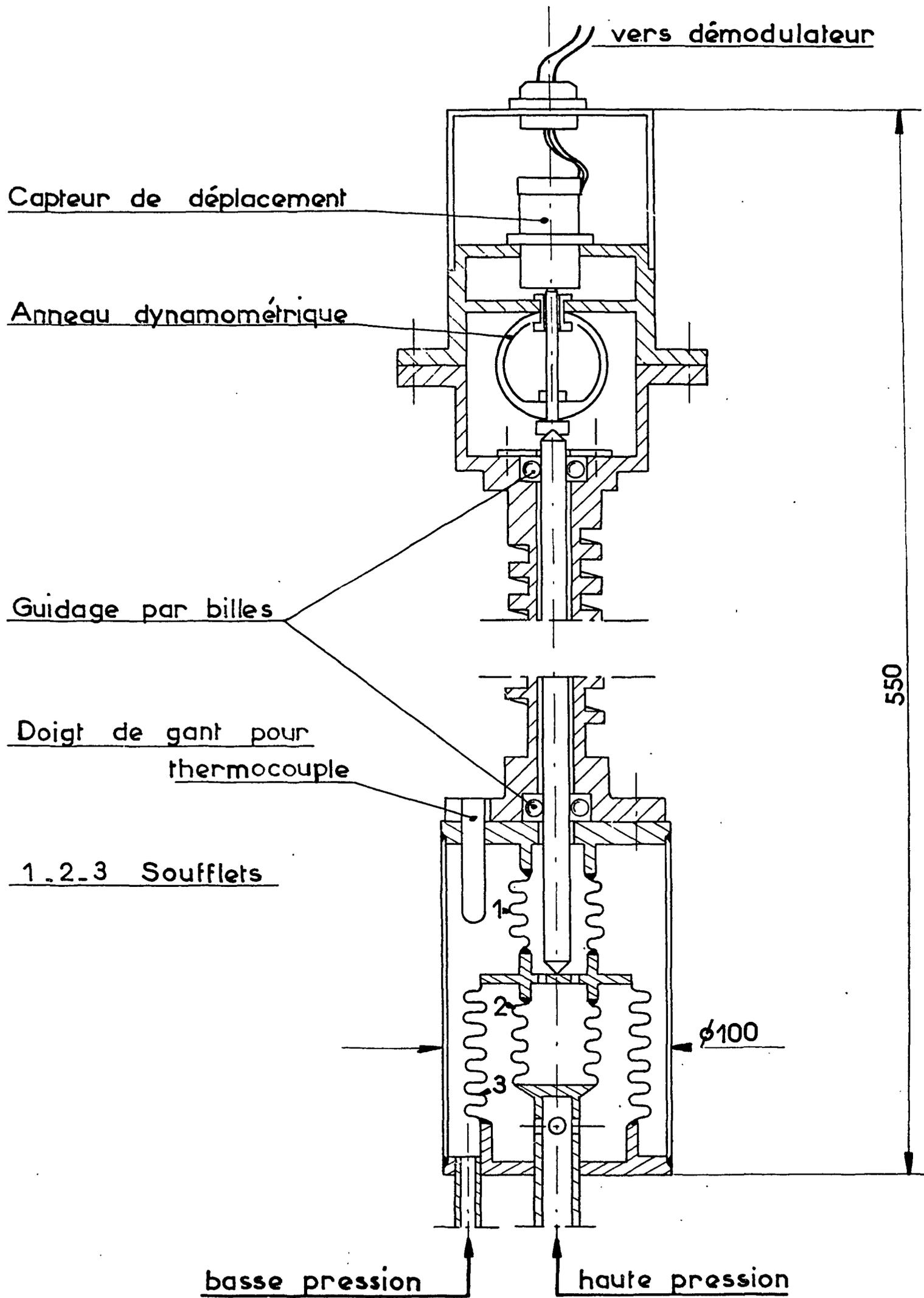
5

10

15

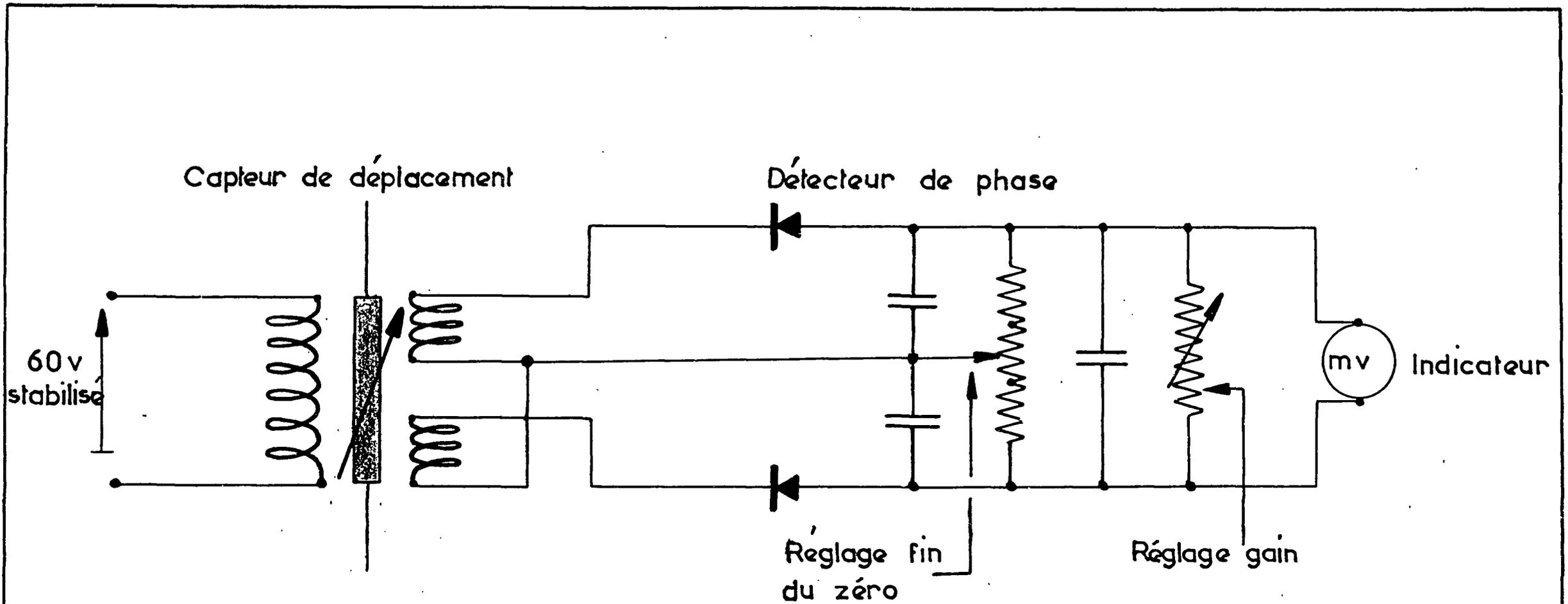
mv





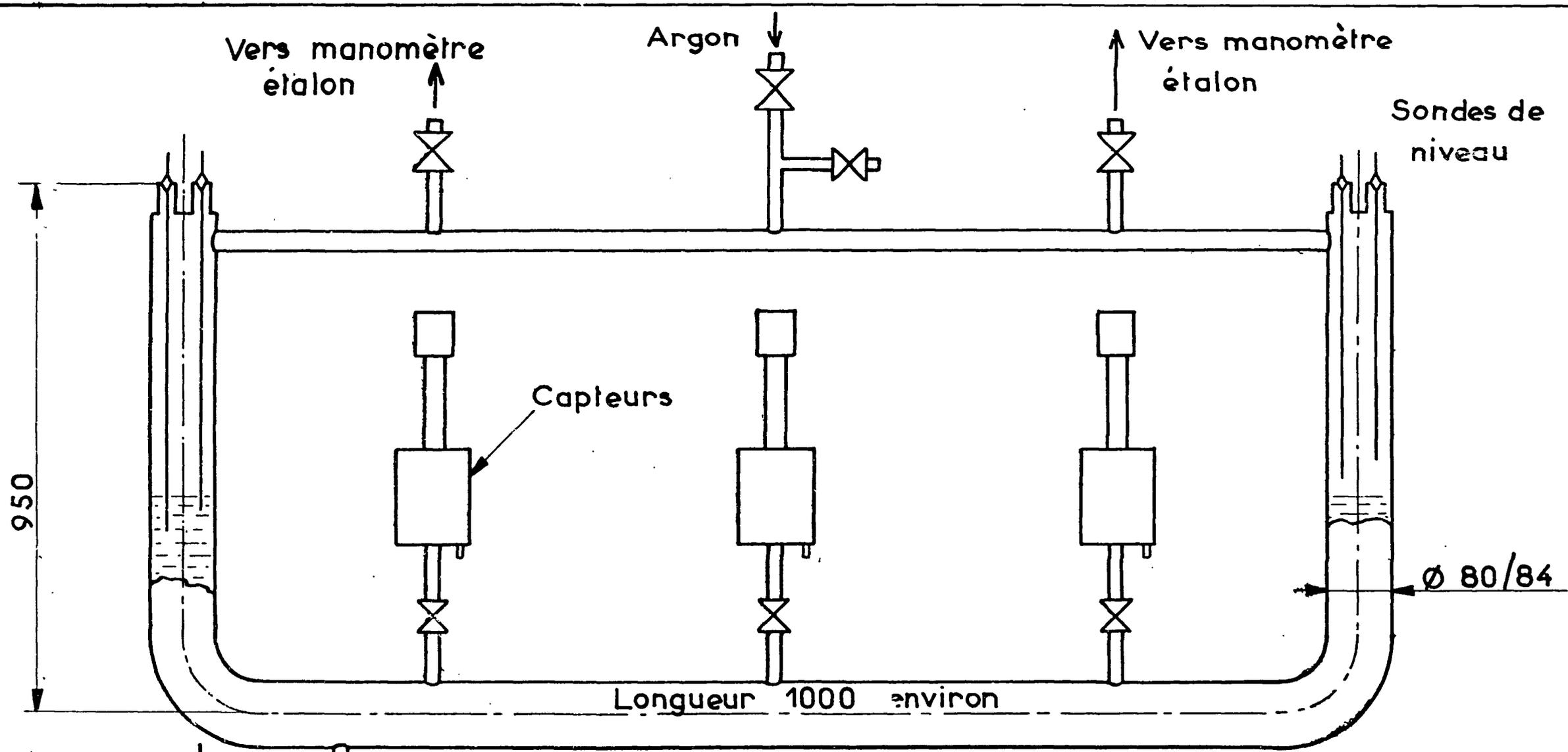
SCHEMA DE CAPTEUR DE PRESSION
DIFFERENTIELLE

FIGURE - II 7



CAPTEUR DE PRESSION DIFFERENTIELLE DÉMODULATEUR

FIGURE . II 8



CAPTEUR DE PRESSION
DIFFERENTIELLE
BANC D'ETALONNAGE

FIGURE II 9

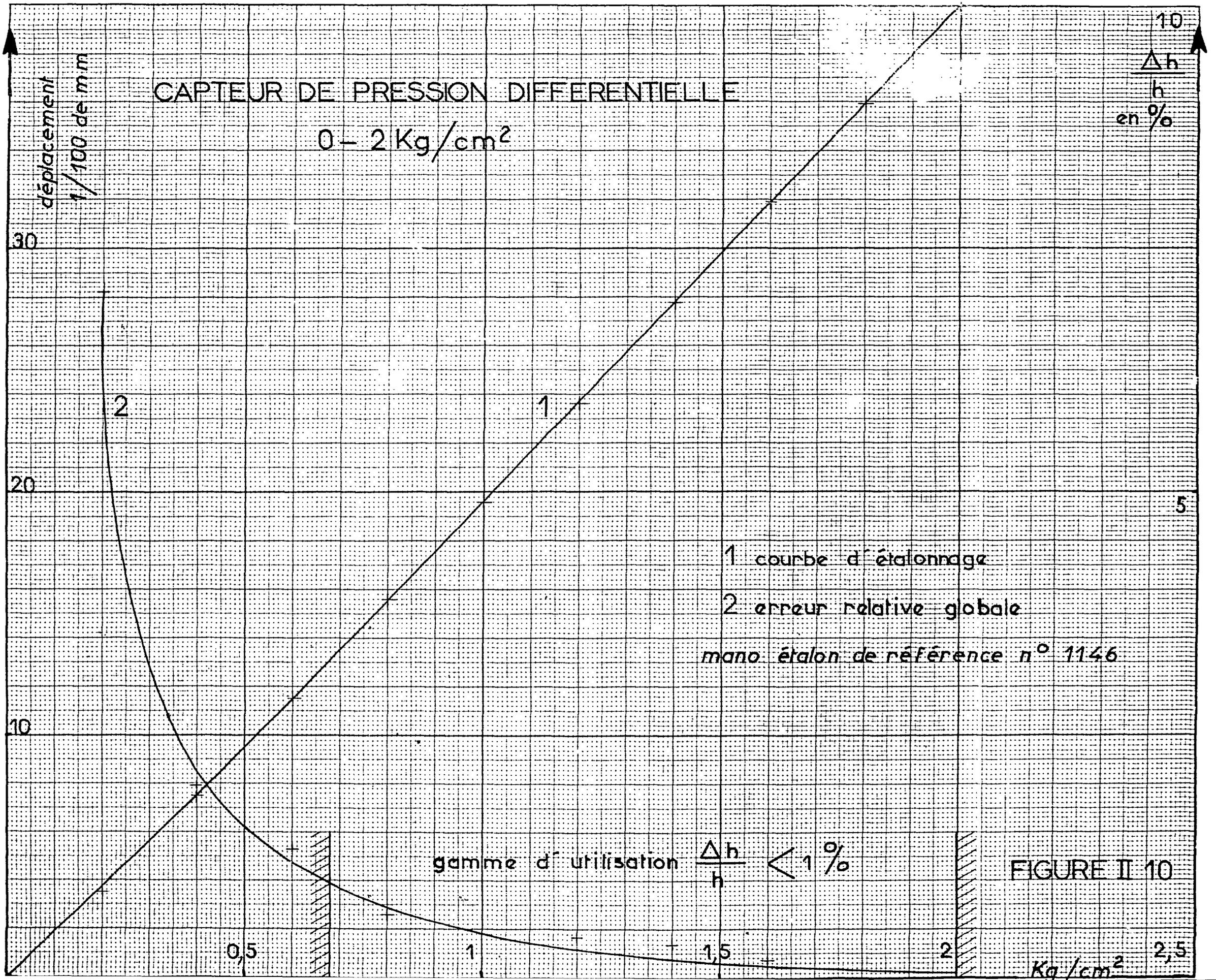


FIGURE II 10

3310

1300

Ceintures de maintien

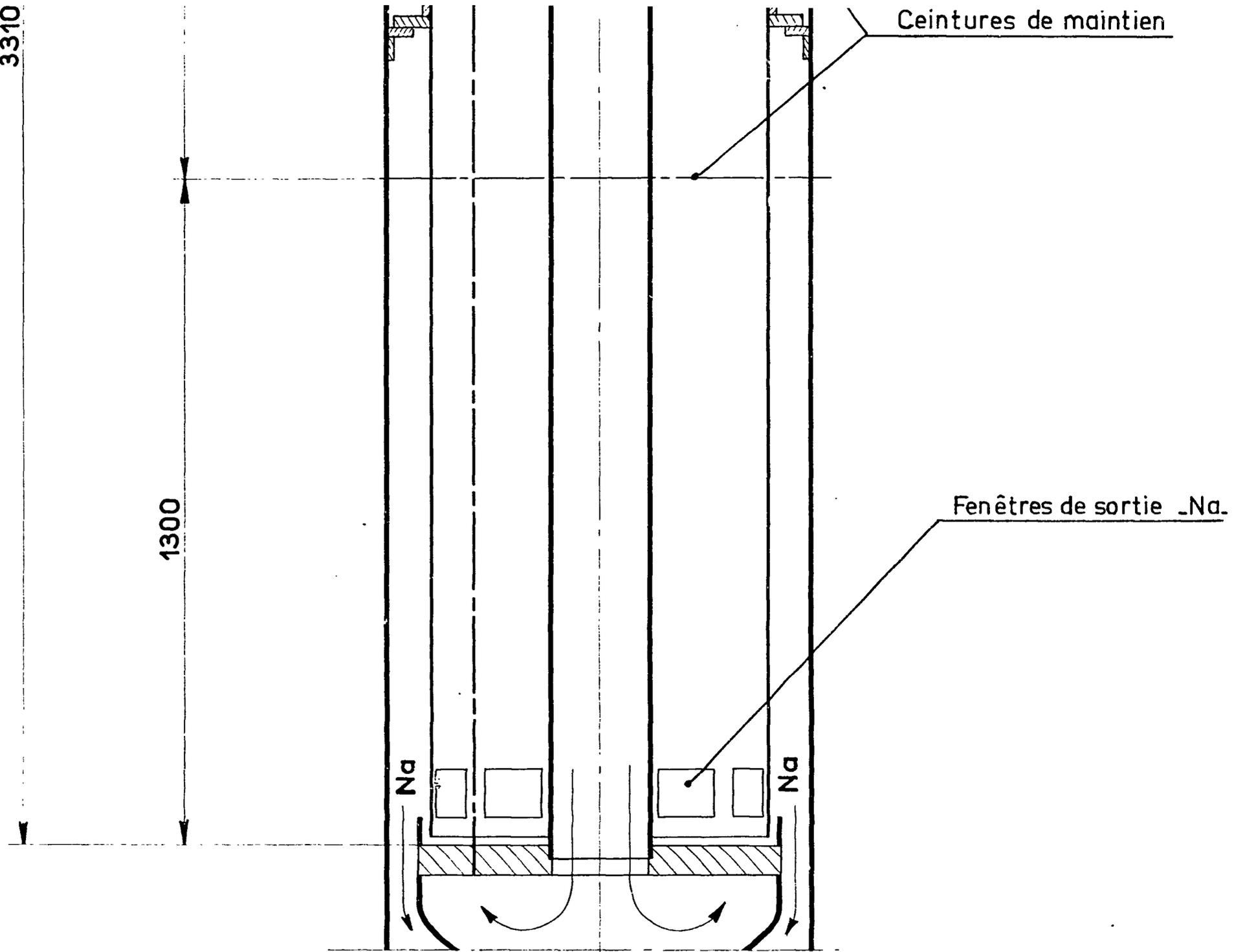
Fenêtres de sortie „Na.

Na

Na

ÉCHANGEUR DE 10 MW POSITION DES SUPPORTS

FIGURE II.11



310

1000

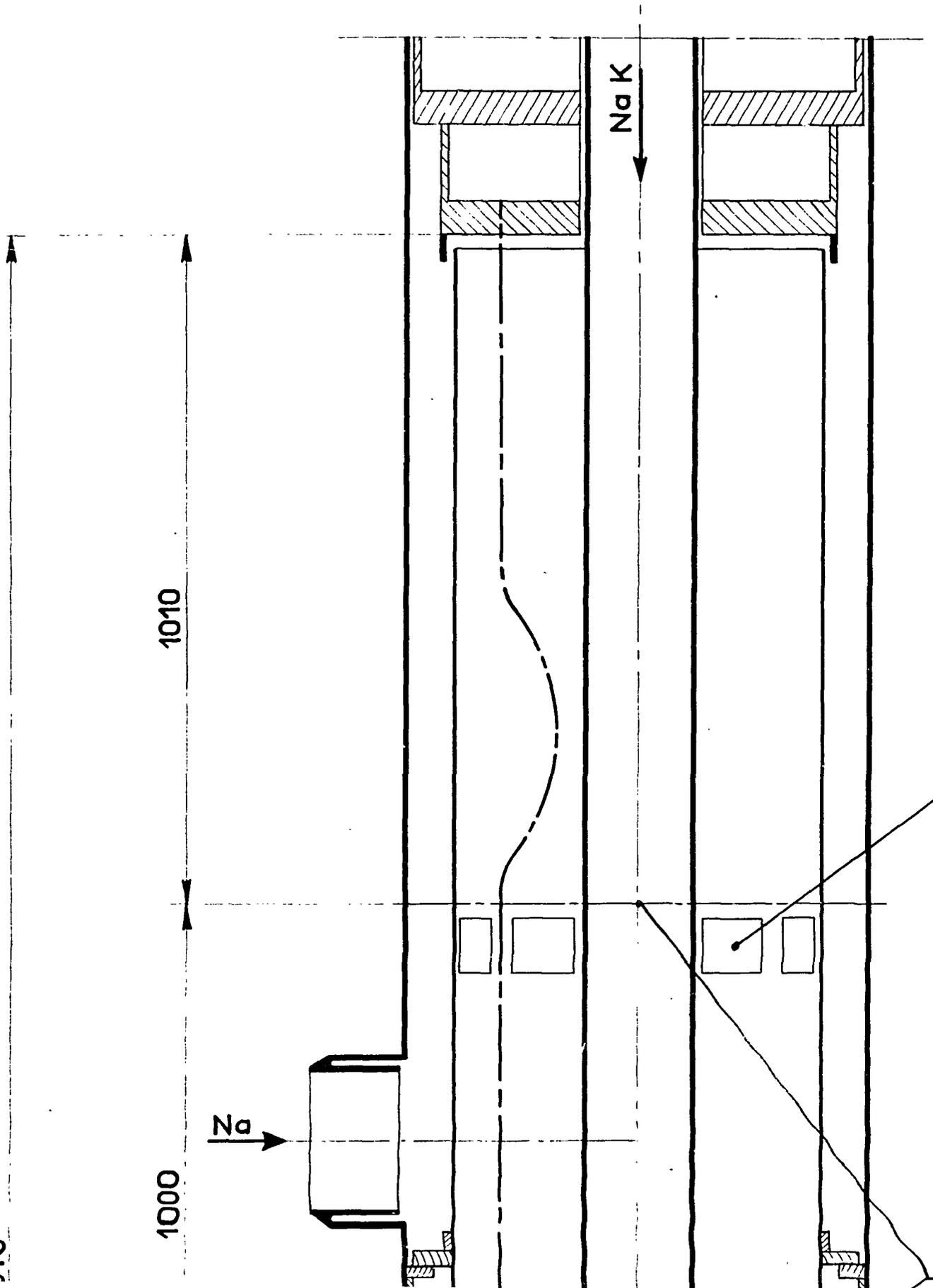
1010

Na

Na K

Fenêtres d'entrée Na

Ceintures de maintien



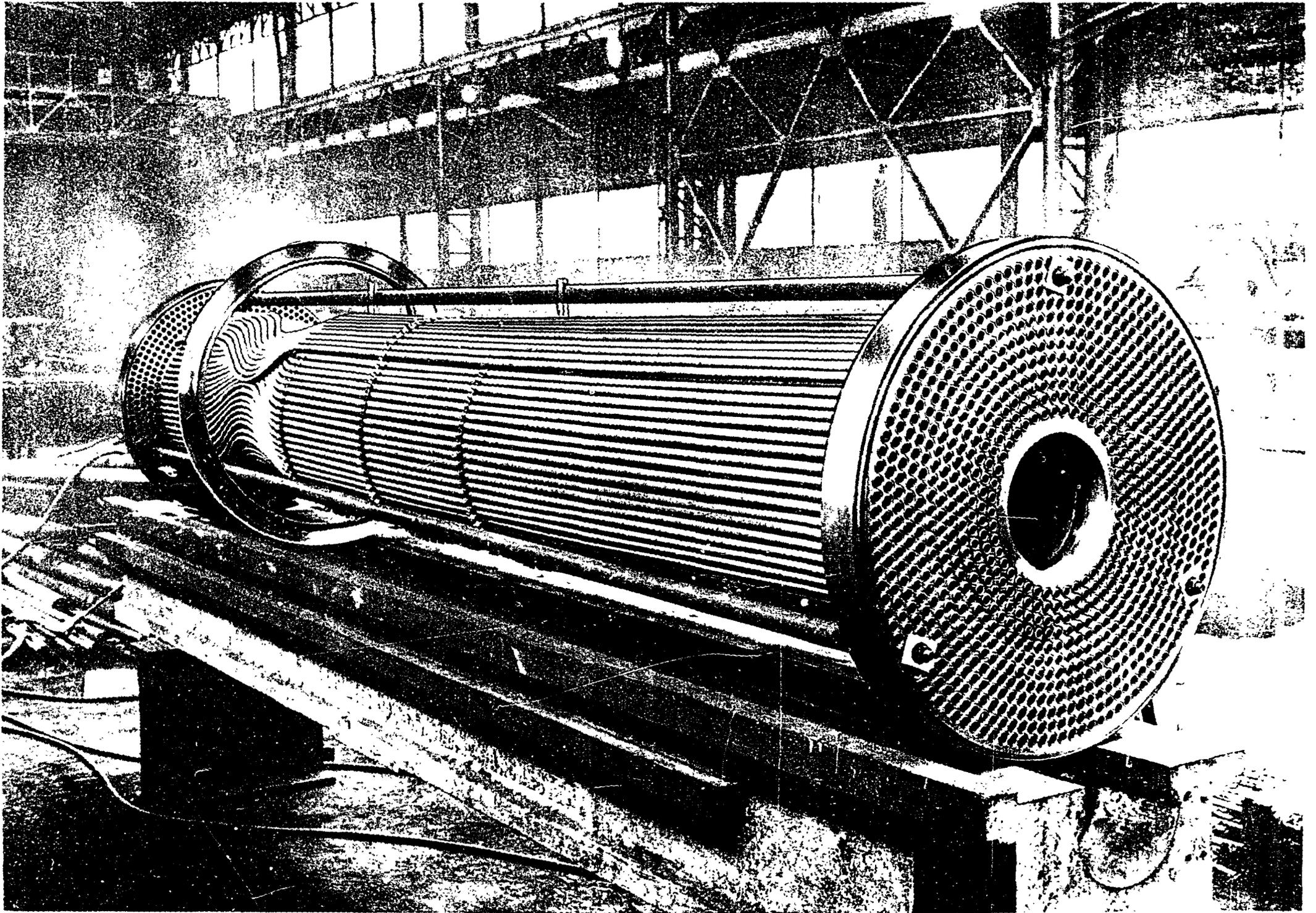


Figure II. 12 - Echangeur intermédiaire 10 MW : Faisceau tubulaire

ÉCHANGEUR INTERMÉDIAIRE 10 MW

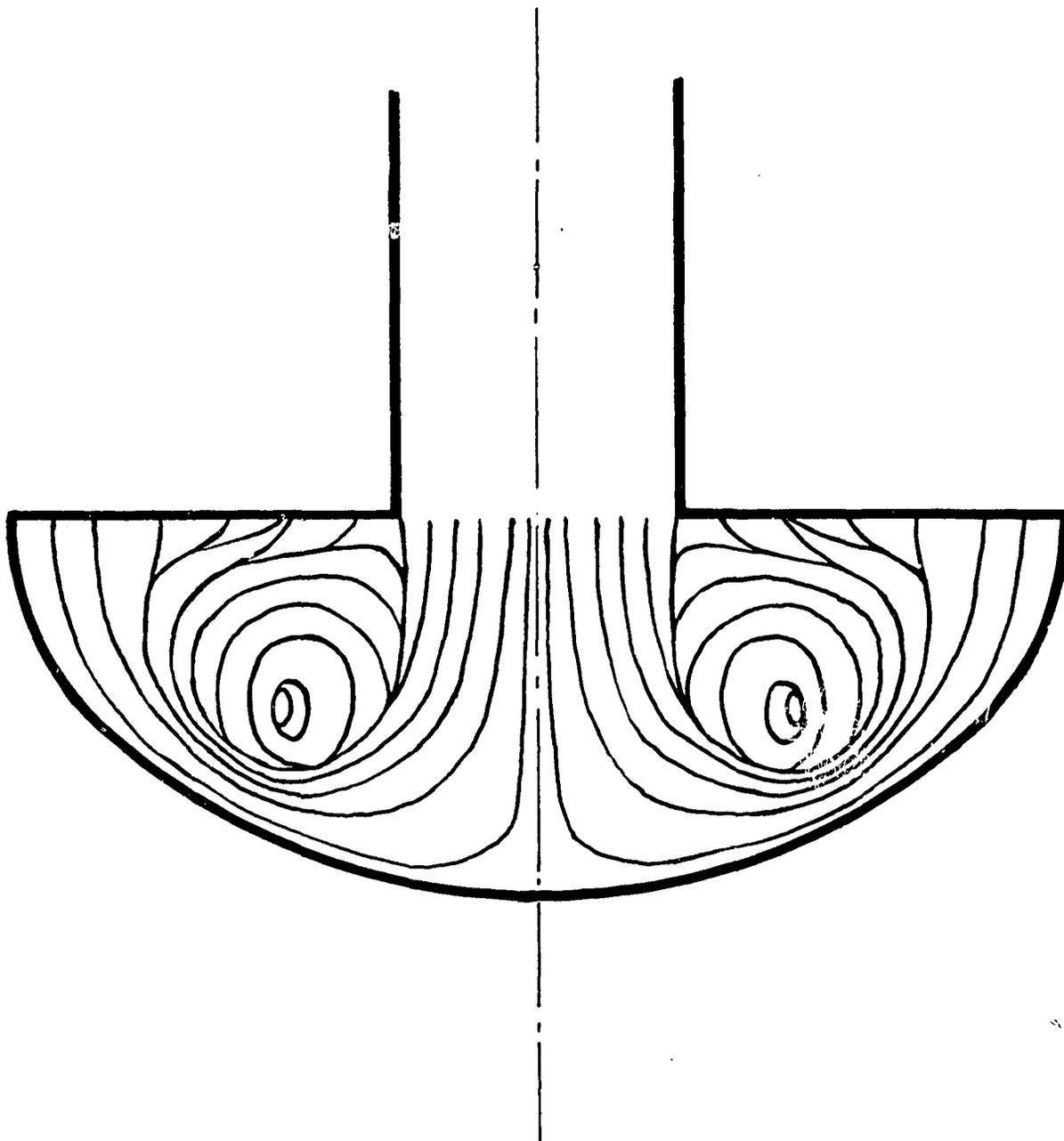


SCHÉMA DE L'ÉCOULEMENT DANS LA CHAMBRE
DE RÉPARTITION DU Na-K.

ÉCHANGEUR INTERMÉDIAIRE 10MW

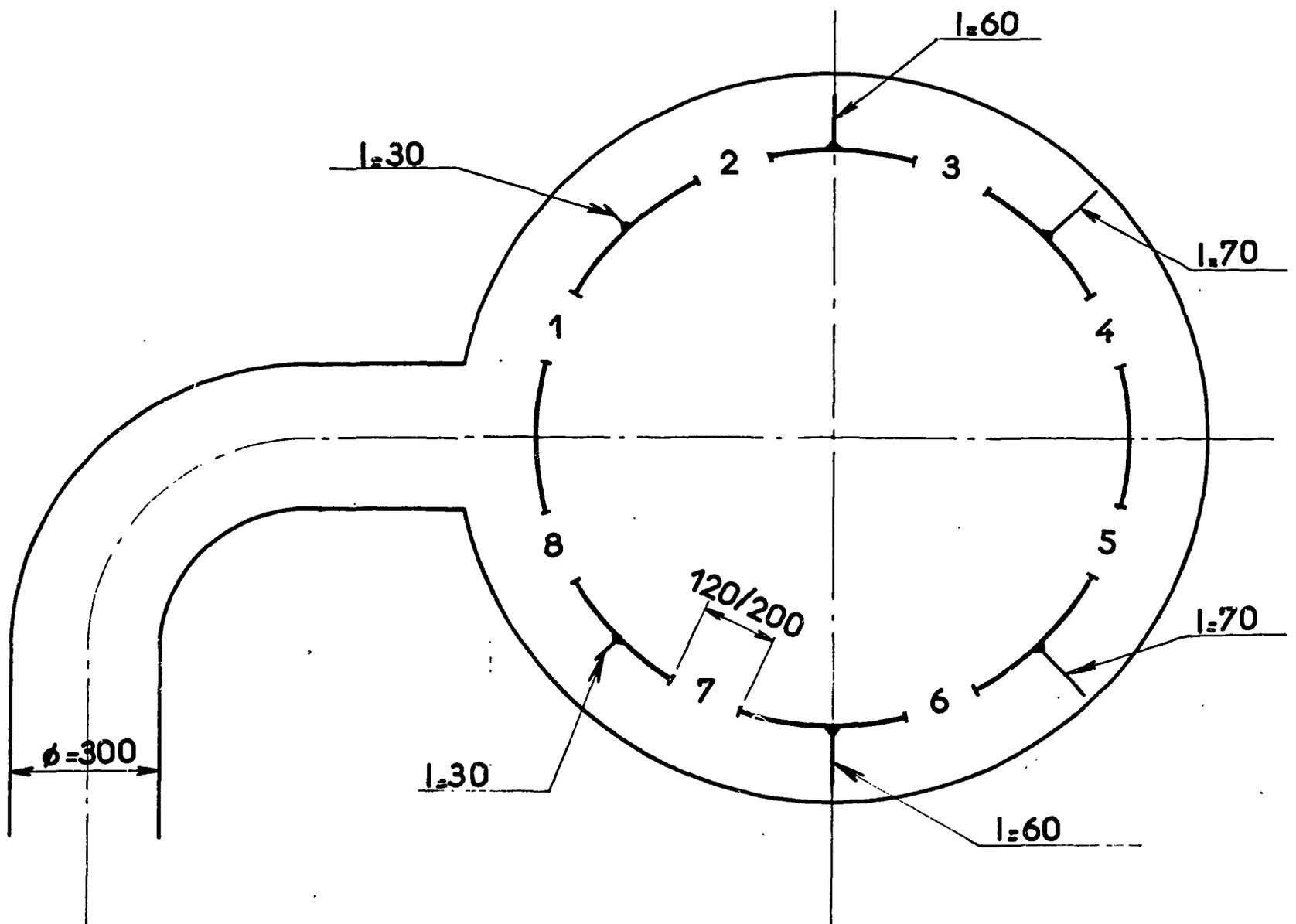
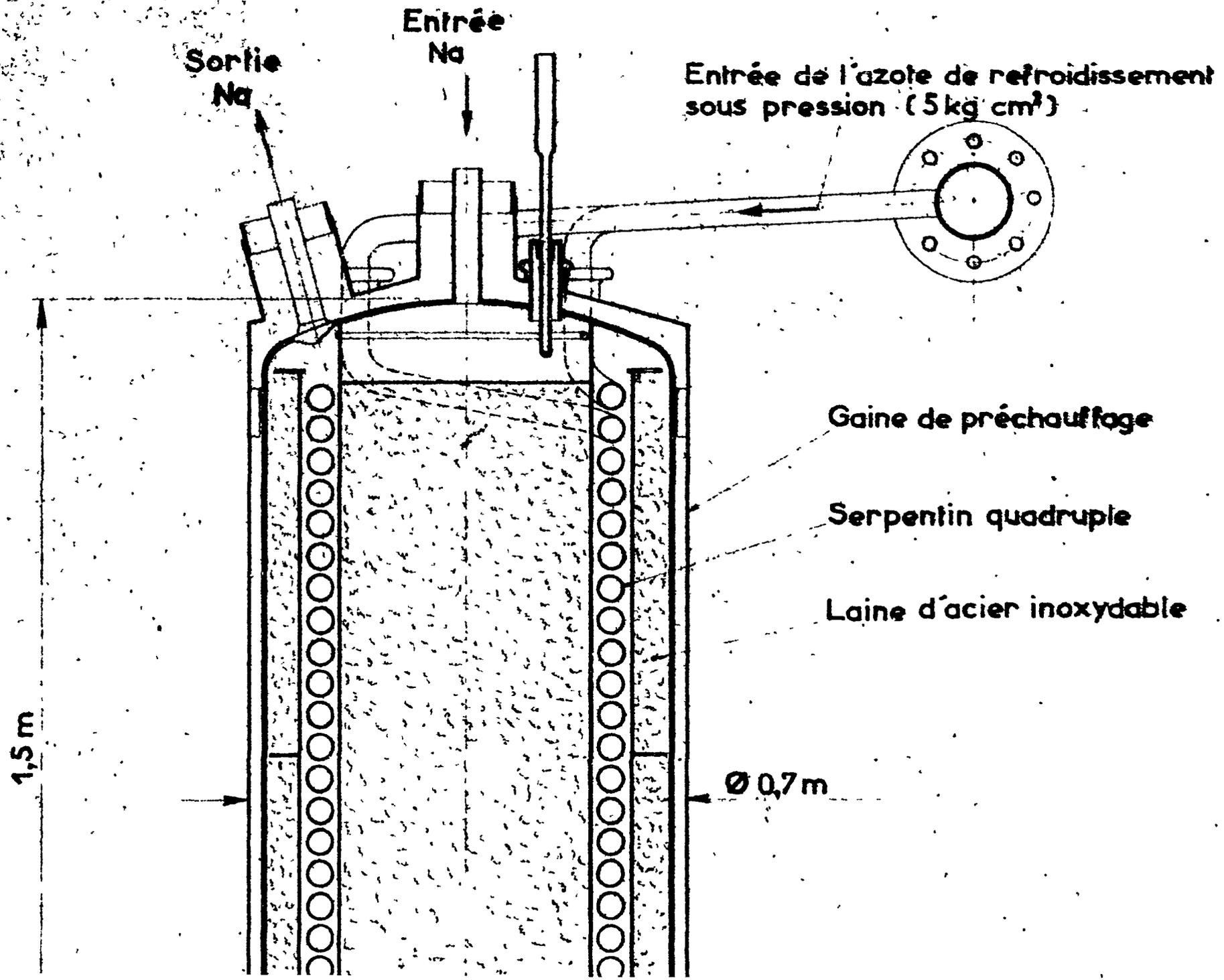
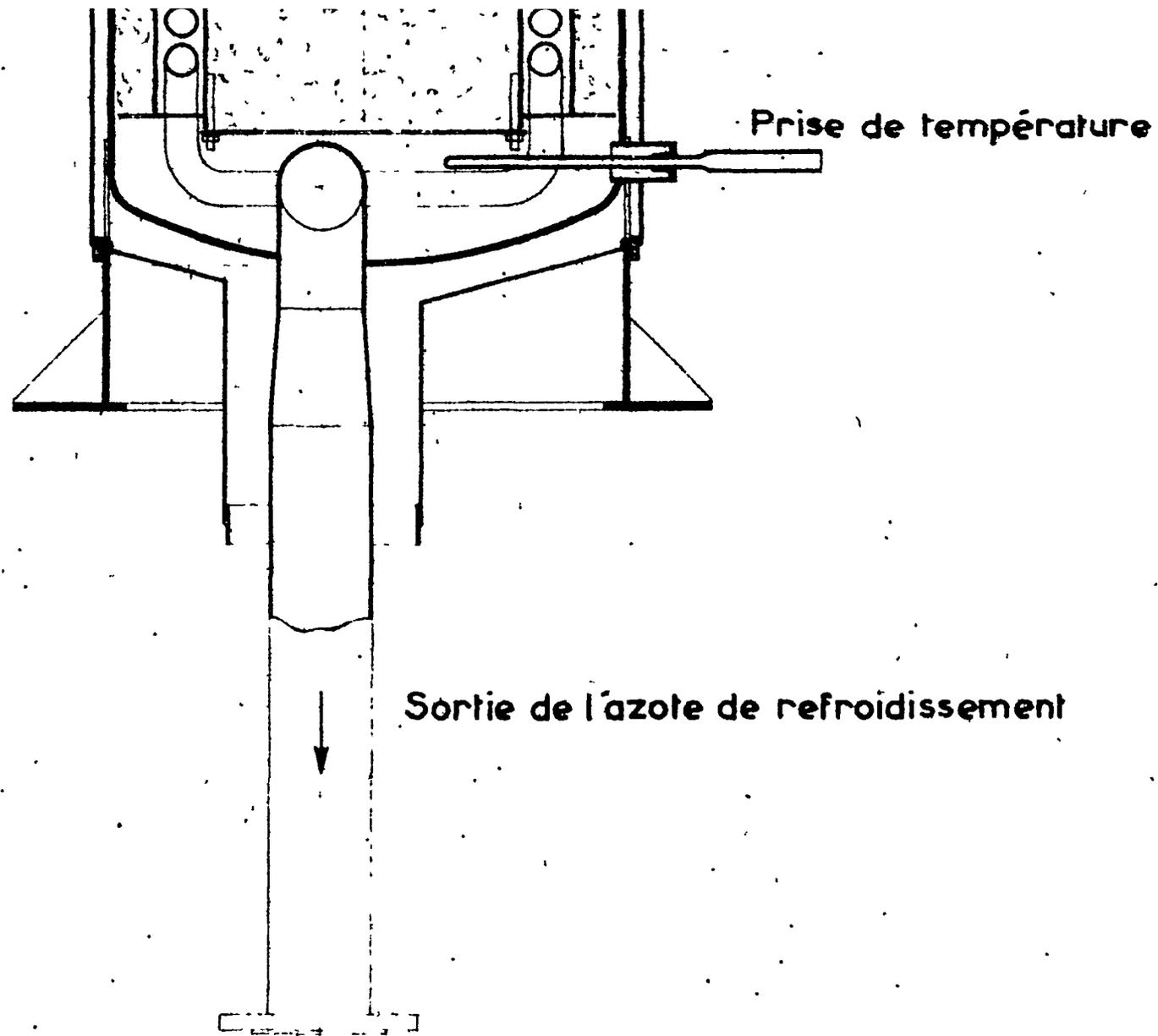


SCHÉMA DU DISPOSITIF RETENU POUR
L'ÉQUIRÉPARTITION DES DÉBITS AUX LUMIÈRES.





PIÈGE FROID

FIGURE II.15

REPARTITION DES TEMPÉRATURES DANS LE PIÈGE FROID

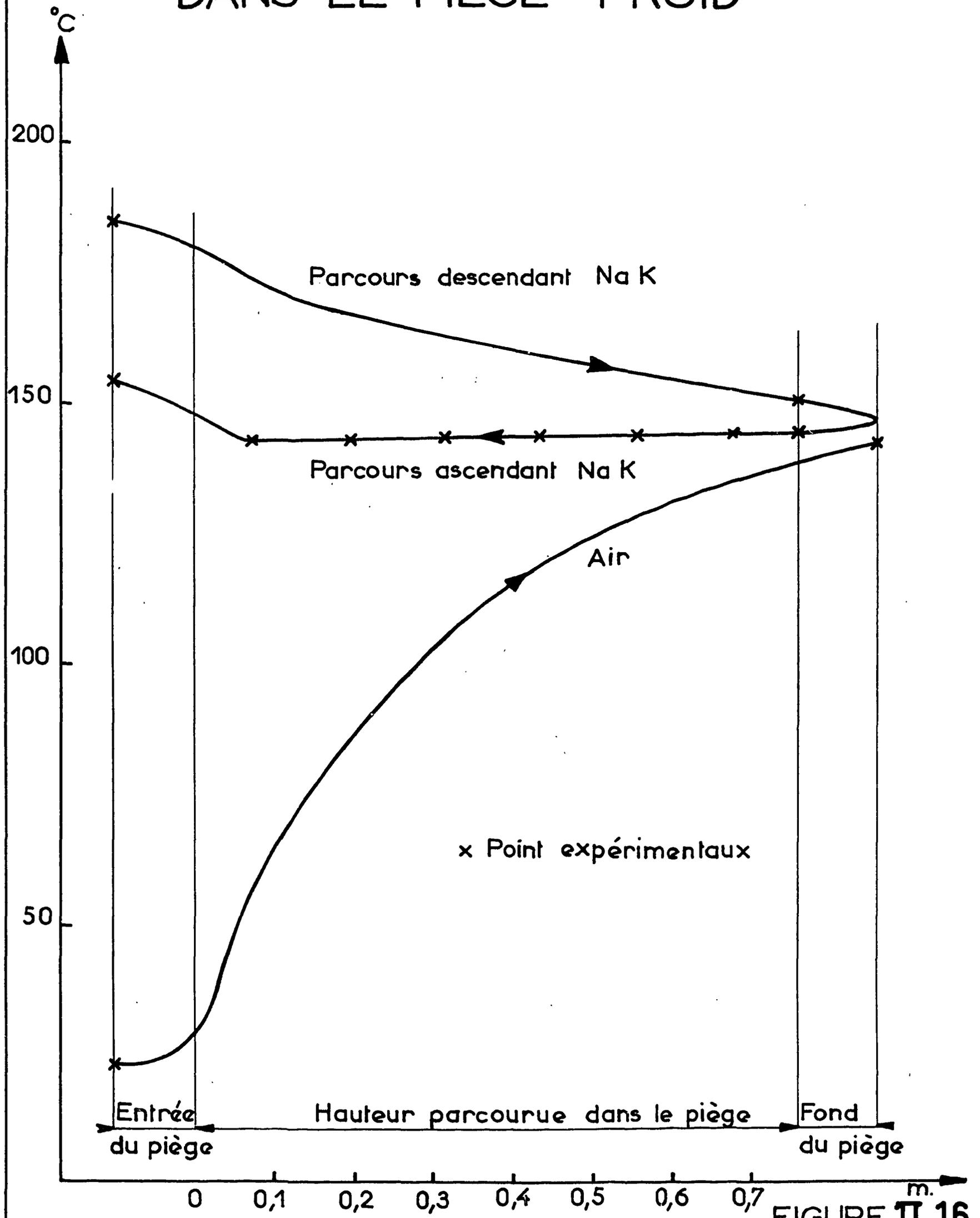
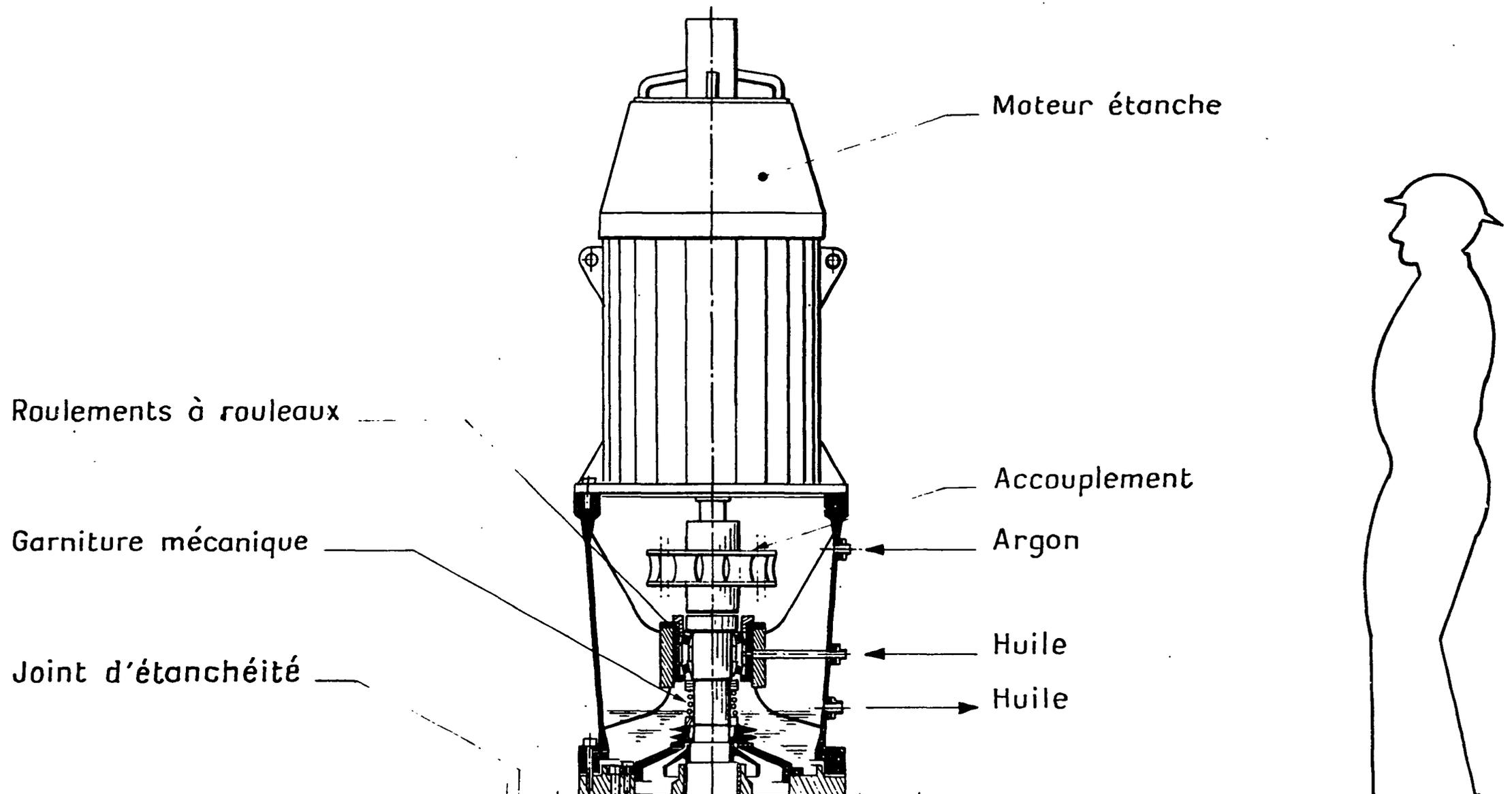
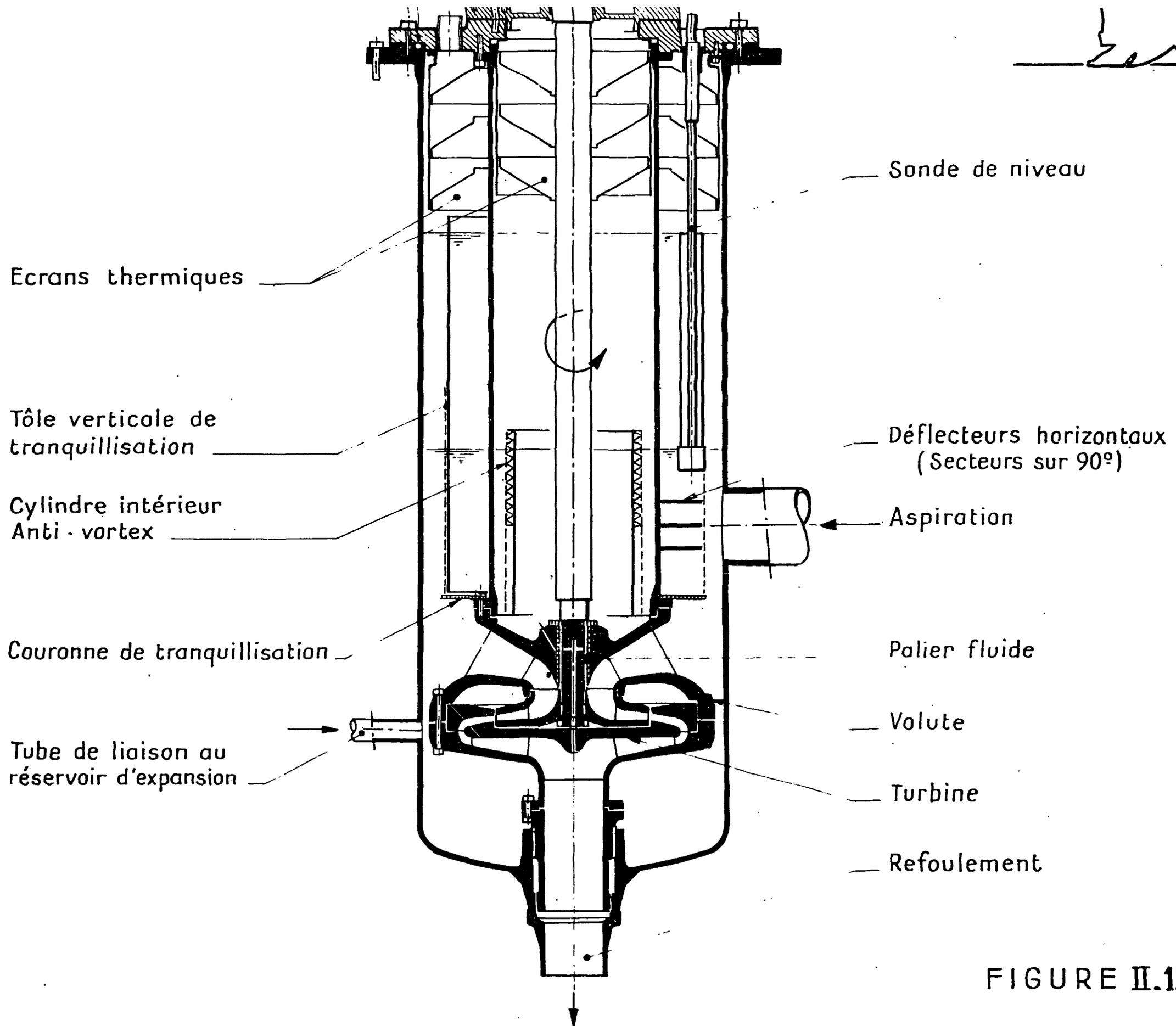


FIGURE II.16

POMPE SECONDAIRE 480 m³/h



[Handwritten signature]



Ecrans thermiques

Tôle verticale de tranquillisation

Cylindre intérieur Anti-vortex

Couronne de tranquillisation

Tube de liaison au réservoir d'expansion

Sonde de niveau

Déflecteurs horizontaux (Secteurs sur 90°)

Aspiration

Palier fluide

Volute

Turbine

Refoulement

FIGURE II.17

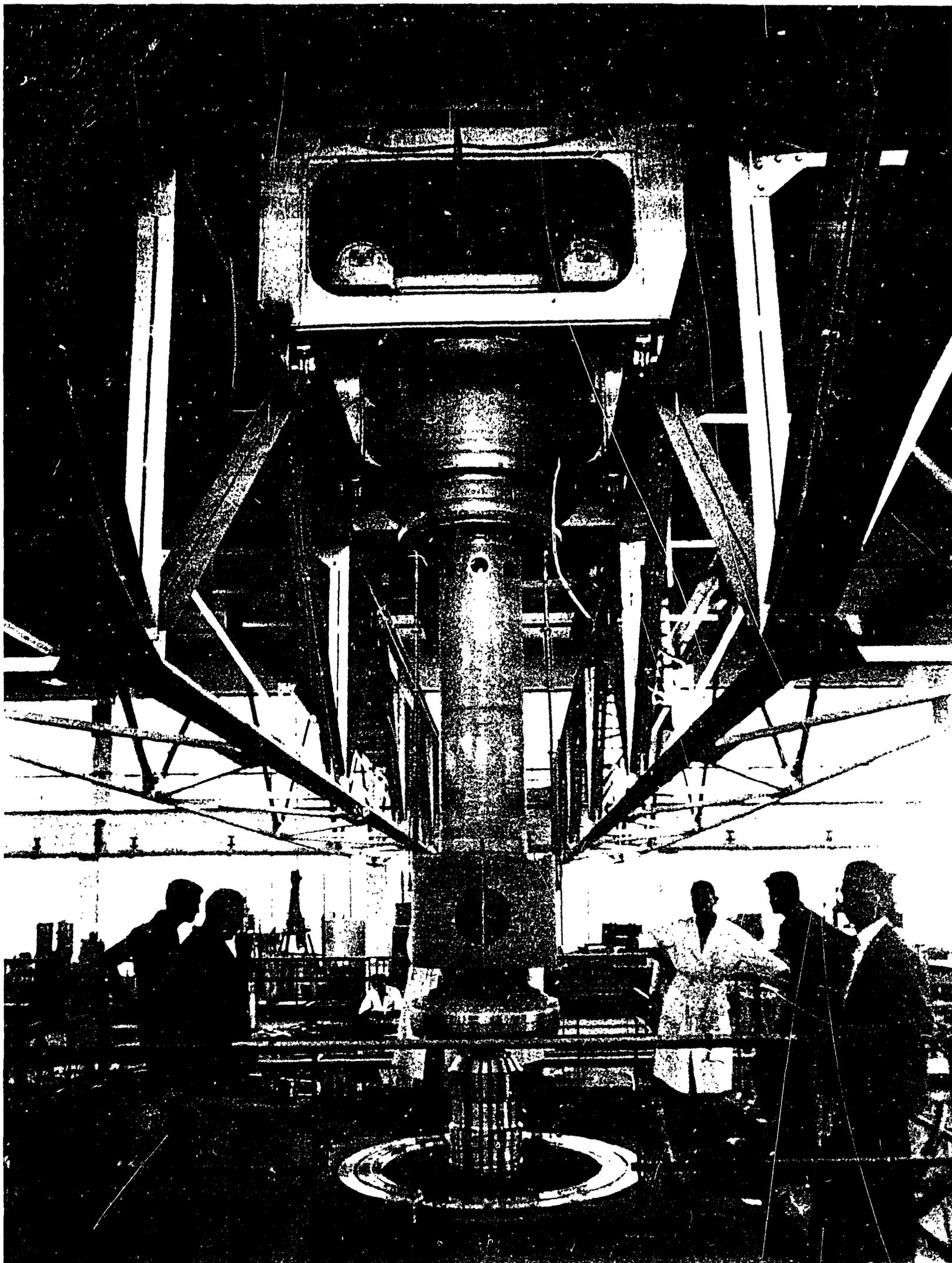


FIGURE II. 18 - Pompe primaire 10 MW (350 m³/h) prête à être placée dans son circuit d'essai.

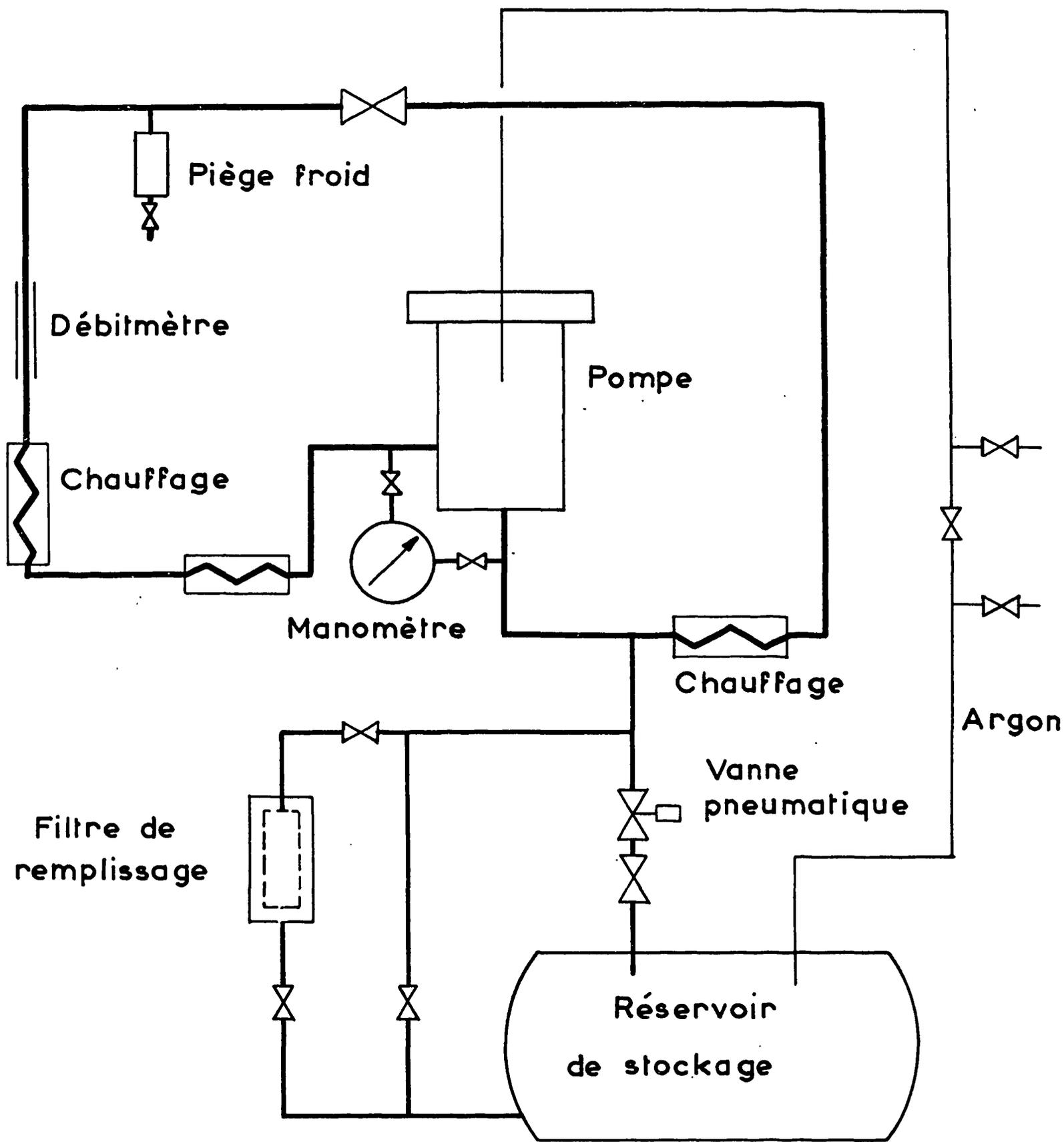
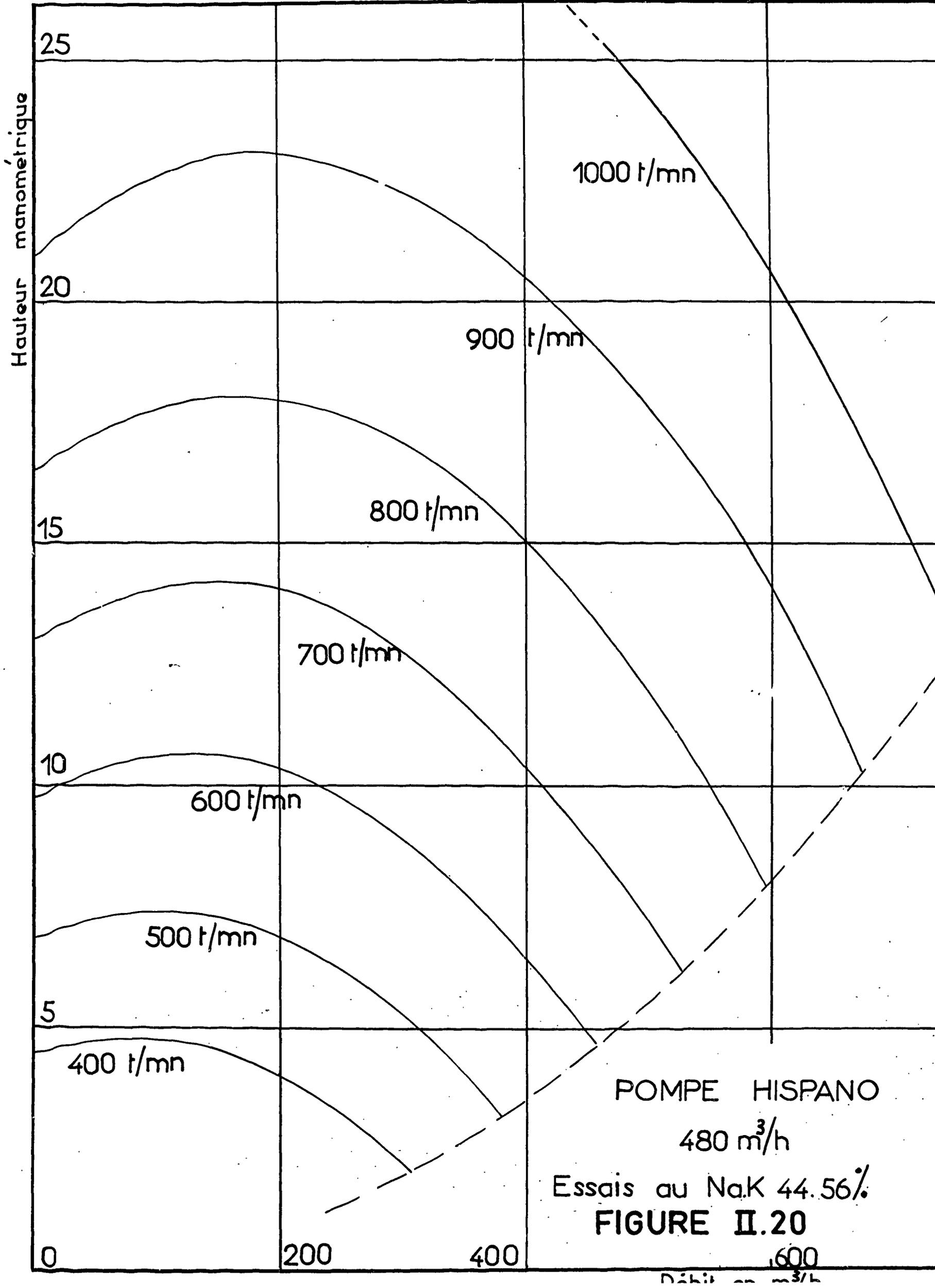
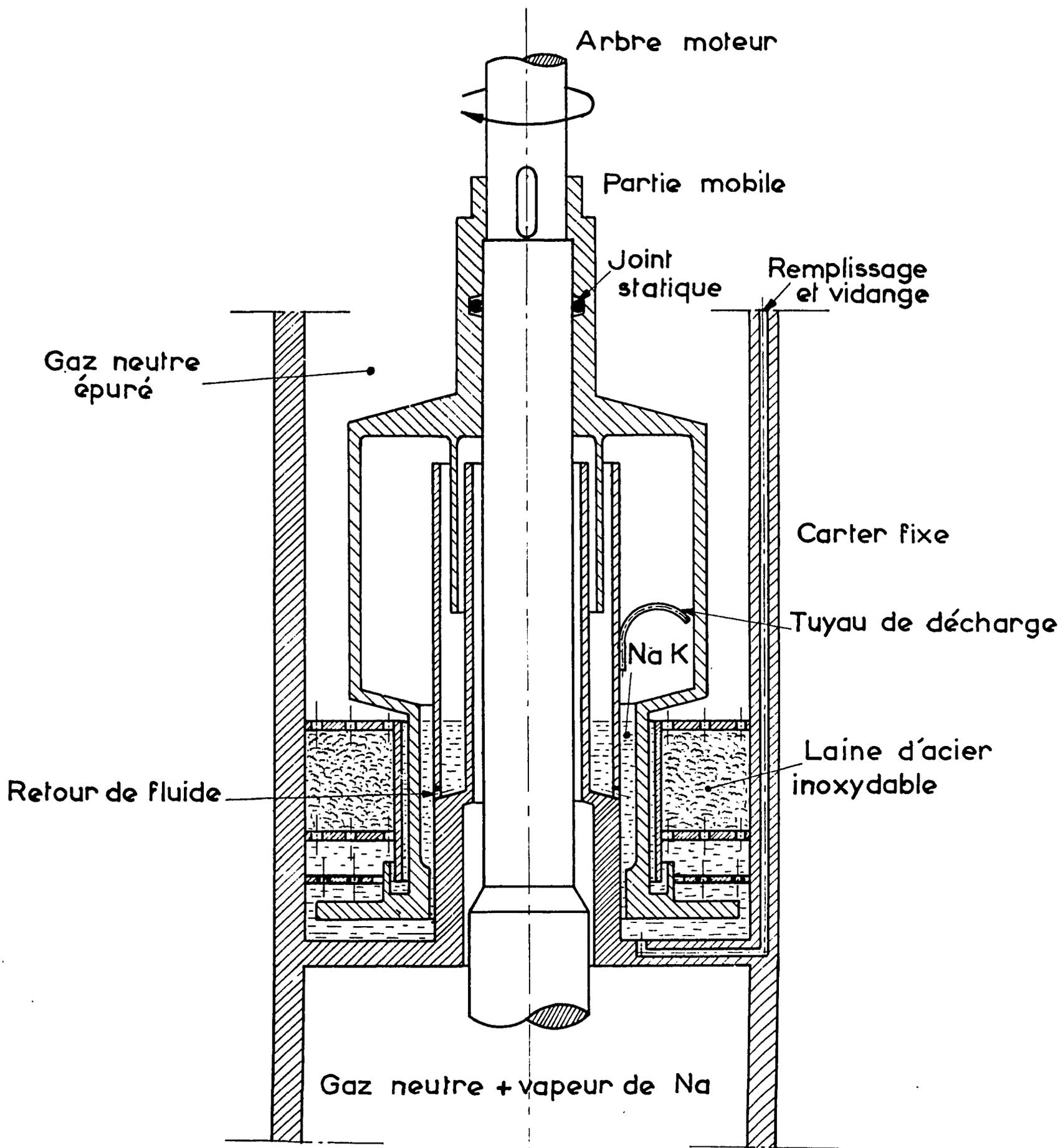


SCHÉMA D'UN CIRCUIT D'ESSAI
DES POMPES

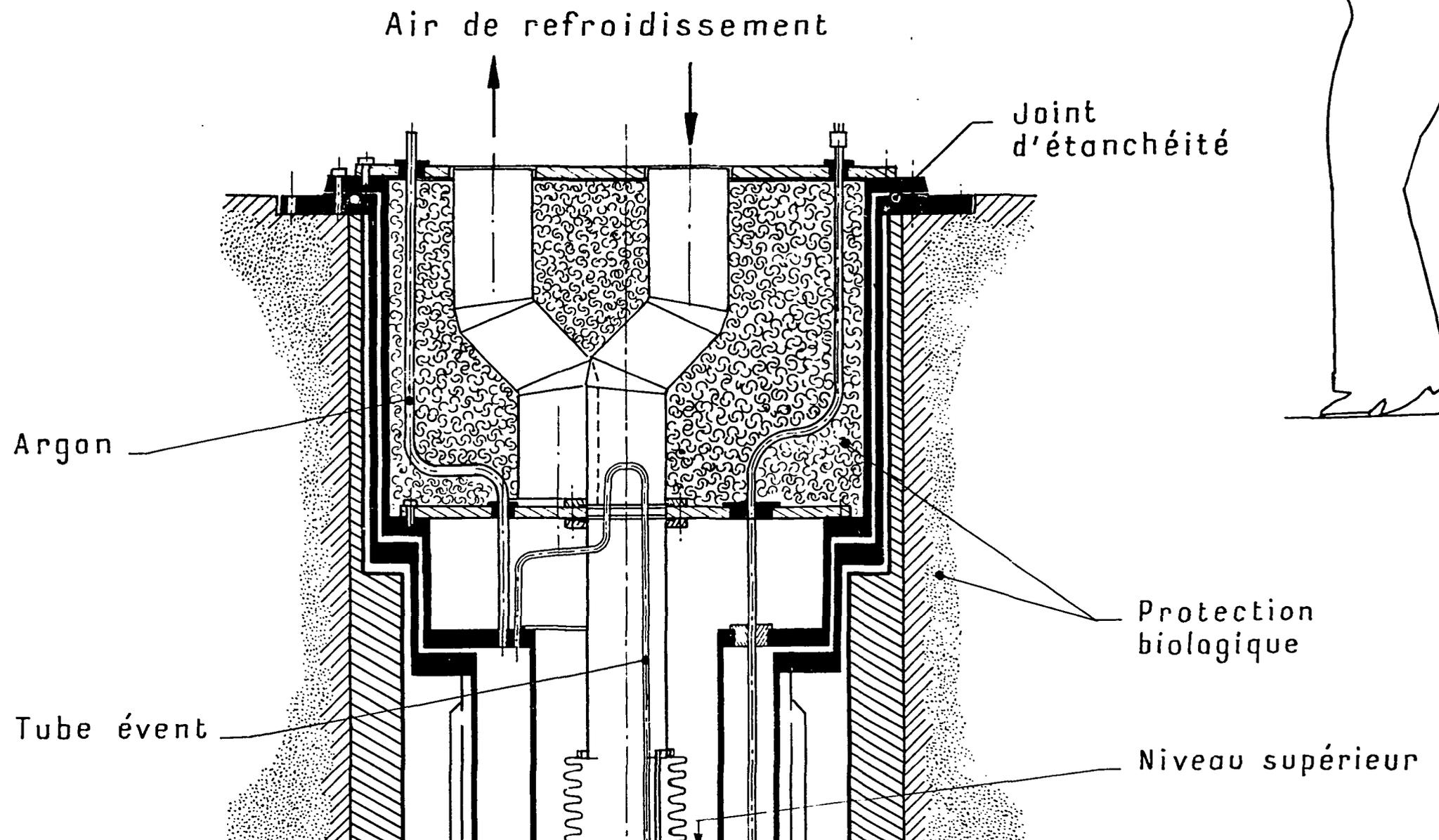


POMPE HISPANO
 480 m³/h
 Essais au Na.K 44.56%
FIGURE II.20
 Débit en m³/h



JOINT TOURNANT ETANCHÉITE PAR Na K

POMPE PRIMAIRE ÉLECTROMAGNÉTIQUE 35 m³/h



POMPE PRIMAIRE ÉLECTROMAGNÉTIQUE 35 m³/h

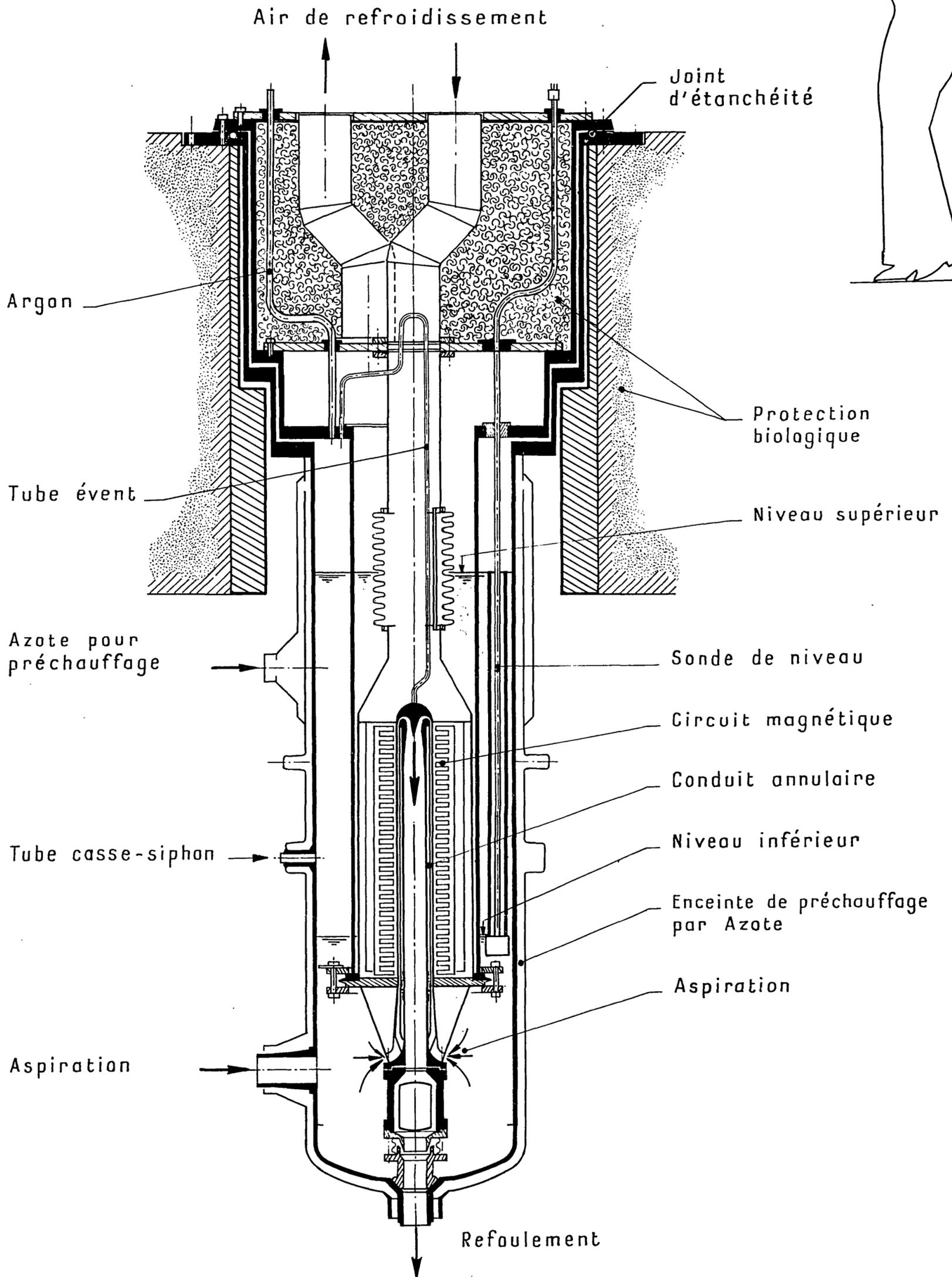


FIGURE II.22

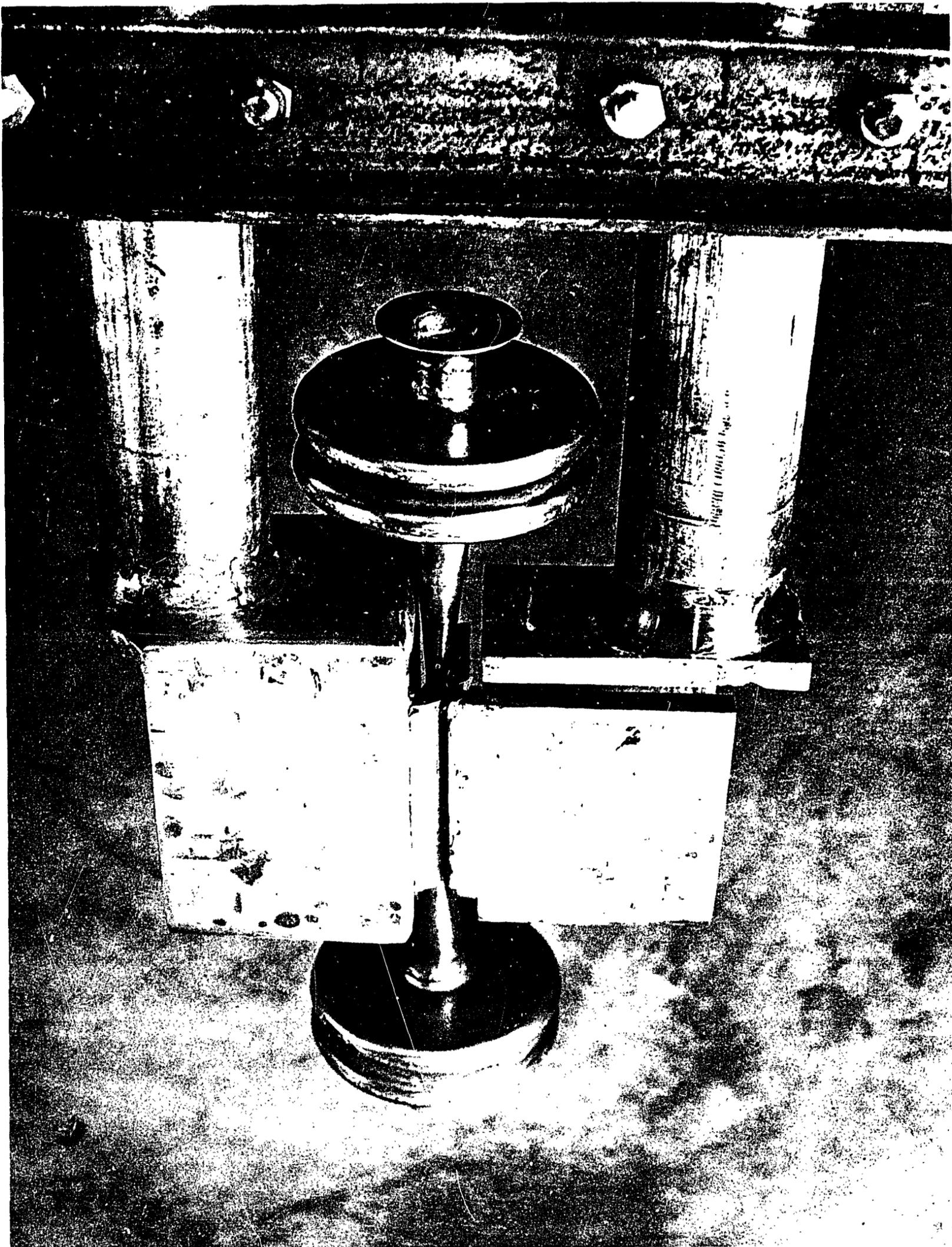


Figure II.23 - Pompe électromagnétique de trop-plein

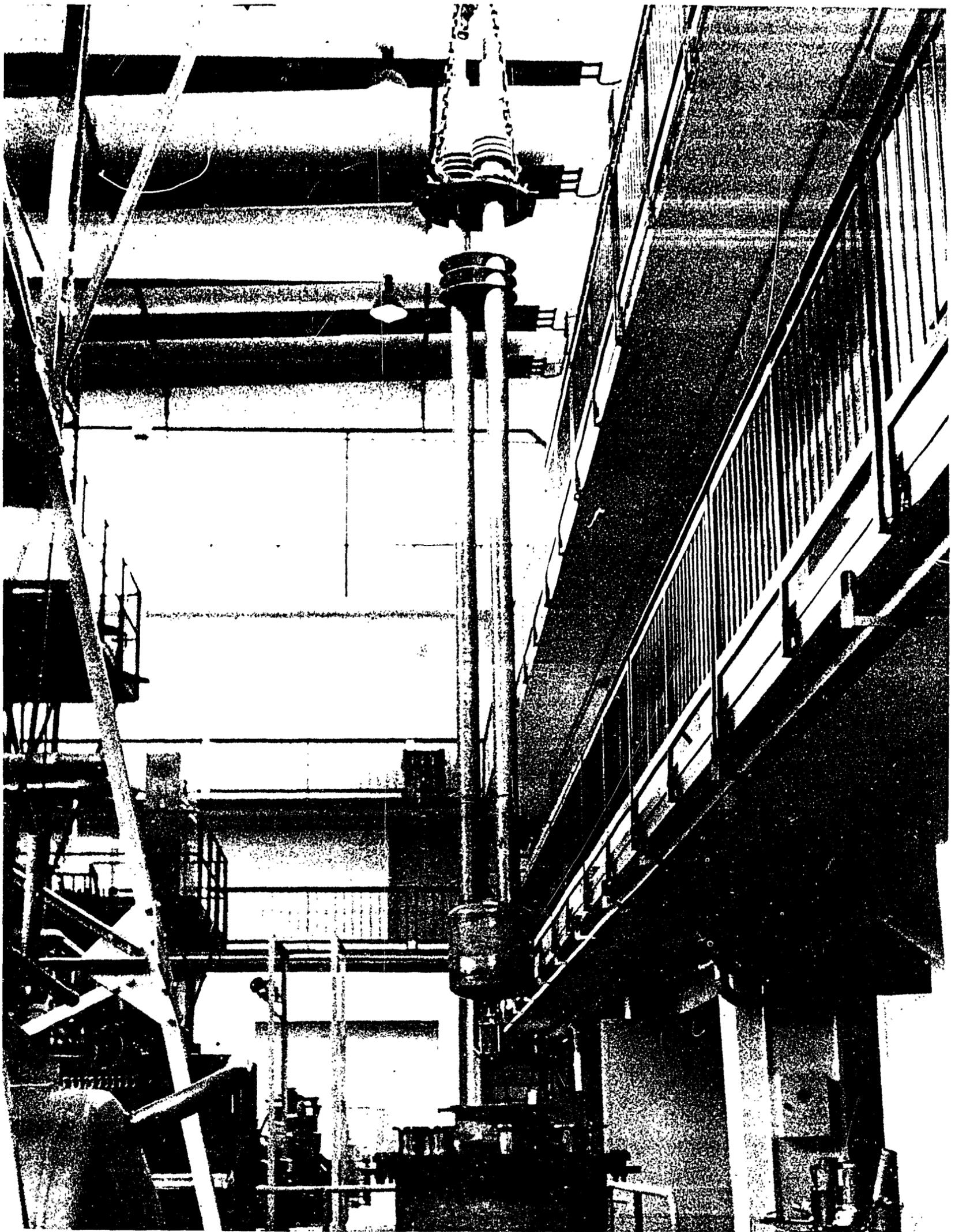


Figure II.24 - Pompe électromagnétique de trop-plein
On voit sur ce cliché l'enveloppe étanche en acier inoxydable
contenant la pompe et les deux barres d'amenée de courant.

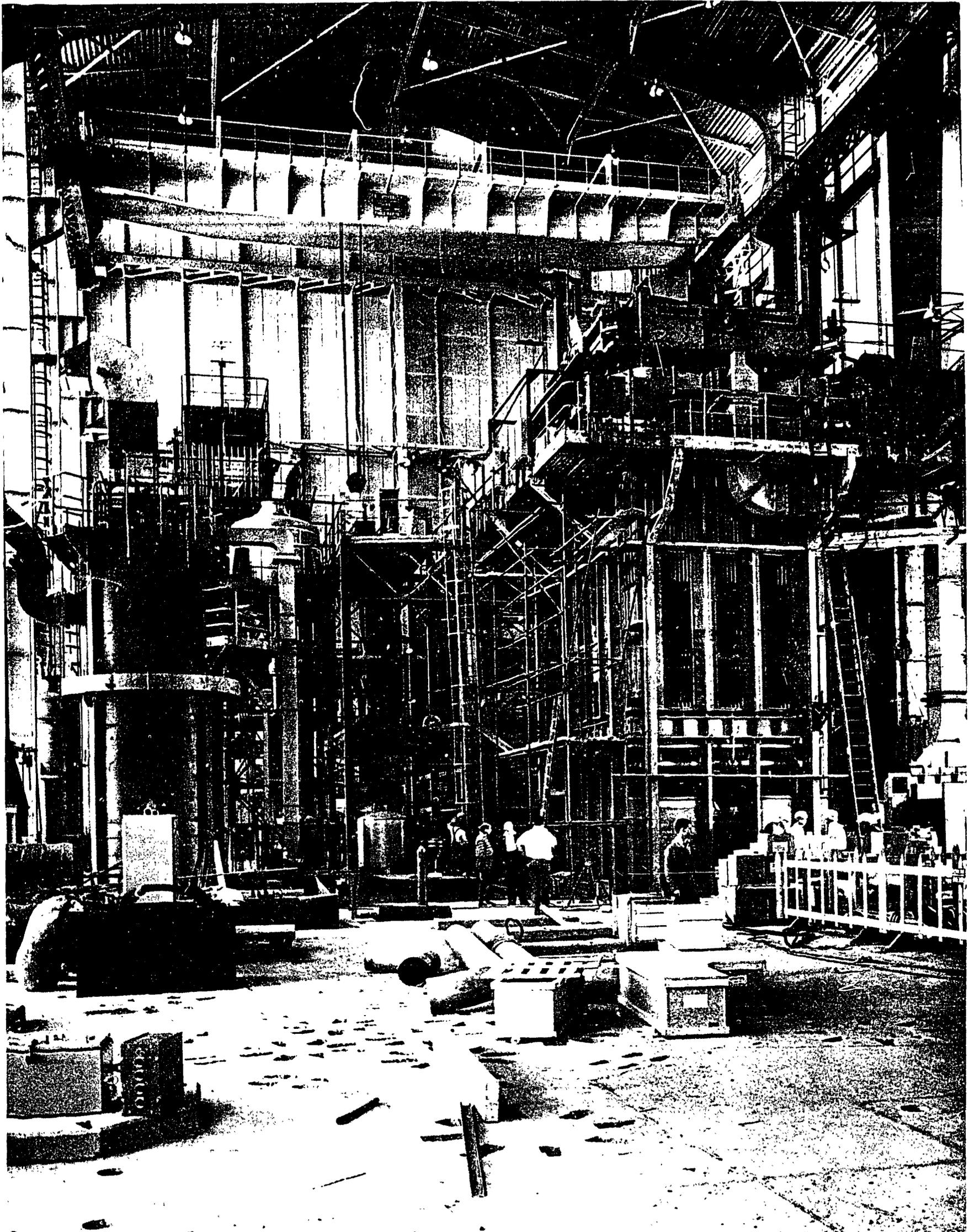
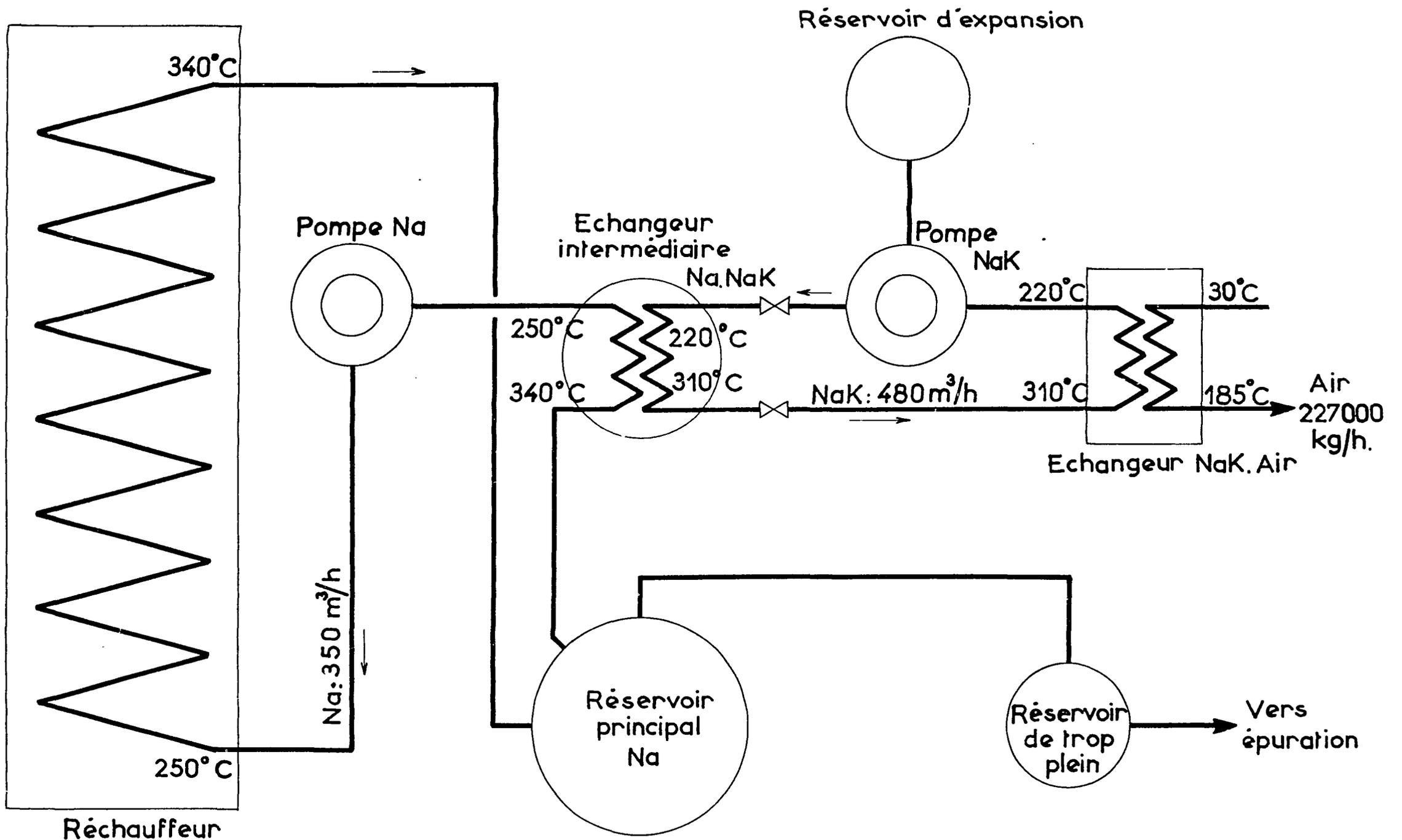


Figure II.25 - Vue des circuits d'essais 1 et 10 MW.
Au premier plan à gauche le réchauffeur 1 MW ,
à droite le réchauffeur 10 MW. Les circuits proprement
dits sont à l'arrière plan cachés par les réchauffeurs.



Nota: Le fonctionnement à la 2^{ème} allure a lieu à un niveau thermique supérieur de 200°C par rapport aux valeurs indiquées sur le schéma, valables pour la 1^{ère} allure.

CIRCUIT D'ESSAI 10 MW

FIGURE II.26

III - ETUDES EXPERIMENTALES DE SURETE

A tous les stades des études liées à la réalisation de la sûreté :

- détermination des conditions d'apparition et de développement des incidents. ,
- dispositions et appareillages destinés à prévenir ou enrayer ces incidents. ,
- protection contre les conséquences des accidents les plus graves qu'il soit possible de concevoir. ,

les recherches expérimentales apportent une contribution importante.

Les expériences et essais relatifs aux deux premiers points ne sont pas , en général , distincts des études expérimentales de conception de la pile.

Nous insisterons seulement sur le troisième point et particulièrement sur ce qui en constitue l'essentiel : l'étude des mesures propres à permettre à l'enceinte étanche de jouer son rôle quels que puissent être les accidents survenant à l'installation.

Les plus grands dangers qui sont susceptibles de menacer l'étanchéité de l'enceinte de Rapsodie sont :

- une libération brutale d'énergie amenant la projection d'éléments du bloc pile (tout en dispersant une partie plus ou moins grande des produits actifs contenus dans le réacteur, ce qui entraîne précisément la nécessité de l'enceinte étanche) .

- un feu de sodium provoquant une surpression importante de l'atmosphère de l'enceinte.

Il est vraisemblable que les feux de sodium les plus dangereux sont ceux qui se produisent à la suite des libérations explosives d'énergie les plus importantes.

Dans ces conditions l'étude de la protection contre les conséquences des accidents les plus graves devait débiter par l'étude des phénomènes accompagnant la libération d'énergie maximale concevable dans Rapsodie.

Il est apparu rapidement qu'une telle étude ne pouvait être effectuée uniquement à l'aide de calculs qui n'auraient pu être que complexes et longs et dont le résultat, hypothéqué par trop de simplifications et d'approximations nécessairement pessimistes, risquait de n'avoir qu'une valeur pratique douteuse.

Il a donc été décidé de procéder à des expériences reproduisant aussi exactement que possible les conditions d'apparition et d'évolution des phénomènes.

EXPERIENCES SUR UNE MAQUETTE DE LA PILE.

Préparation des expériences

Nous en examinons rapidement trois aspects :

- représentation du réacteur ,
- simulation de la libération d'énergie
- mesures.

Représentation du réacteur

A) Choix de l'échelle

La maquette a été construite à l'échelle 3/10, cette échelle ayant été choisie à la suite d'un examen des différents aspects du problème faisant intervenir :

- le prix ,
- la possibilité d'une représentation fidèle (sans difficulté excessive résultant d'une miniaturisation des éléments)
- la quantité d'énergie pouvant être libérée sans danger sur le site disponible pour les expériences ,
- les facilités de montage , de démontage et de réparation de la maquette ,
- les conditions de réalisation des mesures.

B) Représentation des matériaux

Deux difficultés se présentaient pour le sodium et pour l'uranium :

a - L'utilisation du sodium fondu aurait considérablement compliqué la maquette et probablement doublé le délai de réalisation. En outre , comme il était envisagé d'effectuer une série d'expériences ,

l'emploi du sodium aurait entraîné, entre chaque expérience, des opérations de nettoyage très longues. Conformément à ce qui a été fait à l'étranger (USA), on a substitué l'eau, à la température ordinaire, au sodium chaud.

Toutefois, il a été estimé nécessaire de procéder à une vérification de la validité de cette substitution en adjoignant aux essais sur la maquette 3/10 des essais spéciaux sur une maquette plus petite (échelle 1/10). Cette maquette 1/10, qui est à l'heure actuelle achevée, reproduit, en les simplifiant considérablement, les structures de la pile, et servira à des expériences comparatives des effets d'une explosion dans l'eau et le sodium.

b - Après quelques hésitations et étant donné l'importance (considérations théoriques) de la densité des milieux constituant la pile, il a été décidé finalement d'accepter les petits inconvénients inhérents à l'emploi d'uranium et d'utiliser des assemblages fertiles comportant une tige centrale en uranium appauvri, de façon à réaliser exactement la densité de la couverture.

C) Problème de "g"

Pour que les phénomènes de soulèvement du bouchon soient exactement à l'échelle, il aurait été nécessaire d'opérer dans un lieu où l'accélération de la pesanteur soit égale à $10/3$ de l'accélération normale.

Il est donc, de toutes façons, indispensable de procéder à une interprétation des résultats constatés. Toutefois, on a fait en sorte qu'un soulèvement du bouchon sur la maquette corresponde à un soulèvement du bouchon sur la pile elle-même (la similitude des hauteurs de soulèvement n'étant pas conservée). A cet effet, on a augmenté la masse du bouchon en multipliant sa valeur à l'échelle par le facteur $10/3$.

Simulation de la libération d'énergie.

L'étude des accidents les plus graves concevables permet de déterminer les caractéristiques de la libération d'énergie maximale dans Rapsodie, en particulier l'énergie totale mise en jeu : $1,5 \cdot 10^8$ calories et la durée du phénomène : 80 microsecondes. Transposées à l'échelle de la maquette, ces quantités sont respectivement $4 \cdot 10^6$ calories et 24 microsecondes.

La simulation de cet accident maximal a été obtenue de façon très classique en plaçant au coeur de la maquette un volume convenable d'un explosif.

Il avait été envisagé initialement d'utiliser un mélange combustible ayant la particularité de ne donner à peu près aucun gaz résiduel. Ce mélange, étudié par le Service des Poudres et dont la composition est $8 \text{ Al} + 3 \text{ Cl O}_4 \text{ K}$ donne environ 2000 calories par gramme. Il présente malheureusement, entre autres inconvénients, celui d'avoir une vitesse de combustion trop faible et, malgré divers essais d'amorçage il n'a pas été possible de compenser ce défaut.

Finalement, on s'est orienté vers un véritable explosif et c'est l'hexogène CH (1275 calories par gramme) qui a été choisi. Jusqu'ici l'hexogène a donné satisfaction et a permis d'obtenir les vitesses d'explosion convenables.

Toutefois, rien ne prouve que la représentation précise de l'énergie libérée et de la durée de libération suffisent, dans le cas considéré à donner, avec une approximation acceptable, une image des phénomènes qui se passent dans la pile.

Les milieux dans lesquels l'énergie apparaît sont en effet différents dans le cas de la pile (constituants des assemblages combustibles) et dans celui de la maquette. (produits de décomposition de l'explosif). C'est pourquoi une étude théorique de la validité de la simulation est indispensable. Elle est en cours.

Mesures

A priori, on peut craindre que les fragments éventuels des bouchons ou des mécanismes qui sont implantés dans ceux-ci constituent des projectiles d'énergie suffisante pour perforer l'enceinte étanche. Un effort a donc été fait pour essayer de déterminer avec précision les effets de la libération d'énergie sur les bouchons.

Les principales mesures effectuées sur la maquette 3/10 portent sur les grandeurs suivantes :

- a - hauteur de soulèvement des bouchons mobiles
- b - effort exercé par le bouchon fixe sur ses points d'attache
- c - pression dans la cuve, pression sur la face inférieure des bouchons, pression transmise aux circuits de refroidissement.
- d - dimensions des structures essentielles avant et après chaque expérience.

Les mesures a et d, sont effectuées directement, les mesures b, au moyen de jauges à fil résistant (strain gages) et les mesures c, à l'aide de capteurs piézoélectriques.

Programme.

Une première série d'expériences est actuellement en cours. Elle comporte des explosions d'énergie croissante :

- a - $0,25 \cdot 10^6$ calories
- b - $1 \cdot 10^6$ calories
- c - $2,25 \cdot 10^6$ calories
- d - $4 \cdot 10^6$ calories

Après chaque expérience du type a, b ou c, les parties endommagées de la maquette sont ou seront remplacées par des éléments neufs.

L'utilisation de charges progressives présente les principaux avantages suivants :

- la sécurité des expérimentateurs peut être mieux assurée
- il est plus facile d'obtenir un fonctionnement correct des appareils de mesure lors des expériences finales, les plus importantes.
- Les défaillances des appareils de mesure peuvent être partiellement compensées par la possibilité d'extrapoler ou d'interpoler.
- les effets destructeurs de l'explosion apparaissent progressivement ce qui facilite la compréhension des phénomènes.
- des données expérimentales plus nombreuses sont recueillies qui pourront être utilisées, lors de travaux théoriques ou expérimentaux ultérieurs.

Situation actuelle.

Les études des expériences à l'échelle 3/10 ont commencé à la fin de l'année 1959. La construction de la maquette a duré de Juillet 1960 à Février 1961 (figures III.1, III.2, III.3, III.4, III.5).

Quelques expériences préliminaires ont été effectuées hors de la maquette proprement dite, dans des cuves métalliques. Elles étaient destinées à donner une première idée de l'ordre de grandeur des effets de l'explosion, en vue notamment du choix de l'appareillage de mesure et ont été réalisées à la fin de 1960.

Les deux premières expériences dans la maquette, portant sur une libération d'énergie de $0,25 \cdot 10^6$ calories, ont eu lieu en Juin 1961. Dans l'une de ces expériences, les barres d'uranium n'avaient pas été placées dans les assemblages maquettes pour observer l'effet de la variation de densité du milieu entourant la charge.

Les études des expériences comparatives eau-sodium à l'échelle 1/10 ont commencé en Février 1961. La maquette a été achevée en Septembre et les expériences vont probablement débiter en Octobre.

ESSAIS SUR MAQUETTE DE L'ENCEINTE ETANCHE.

Une maquette à l'échelle 1/10 de l'enceinte étanche est en cours de réalisation. Elle doit permettre de vérifier que cette enceinte satisfait bien aux conditions qui sont exigées d'elle, en particulier qu'elle résiste aux conditions prévues en cas de feux de sodium (surpression de 2,4 kg/cm²).

Les essais suivants sont prévus :

- essais à l'eau pour mesurer les contraintes et les déformations dues à la pression seule. Les mesures seront faites aux points les plus sollicités.
- essais de pression à l'air.
- études expérimentale des contraintes dues au poids seul.
- mesure des contraintes dues au pont roulant
- mesure des contraintes locales aux points singuliers et aux renforcements.
- mesure des contraintes dues aux vents et aux séismes.
- étude de la résistance à la dépression.

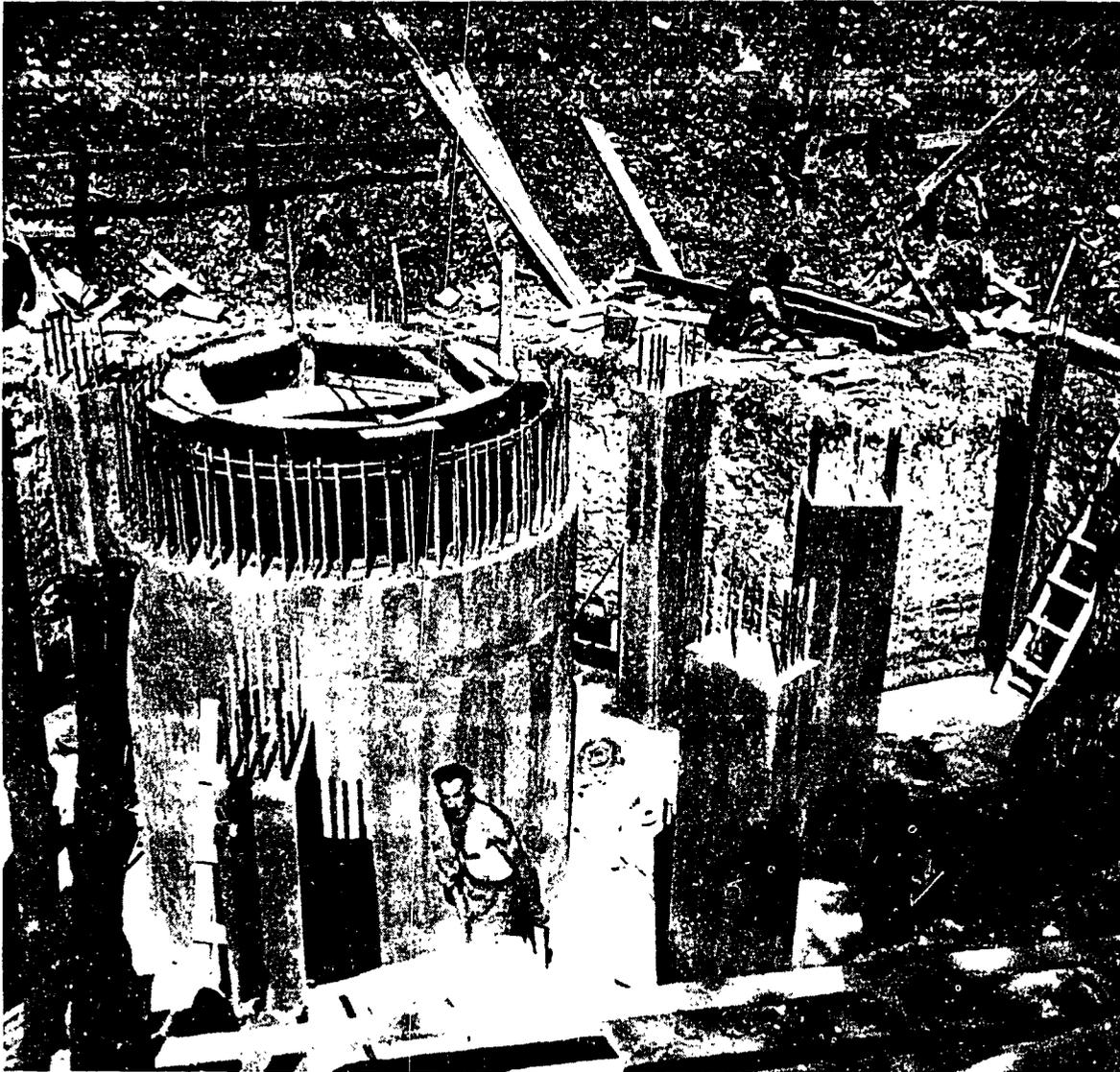


FIGURE III. 1

Vue du chantier de construction de la maquette de sureté.

On distingue le cylindre de béton fortement armé entourant la cuve.

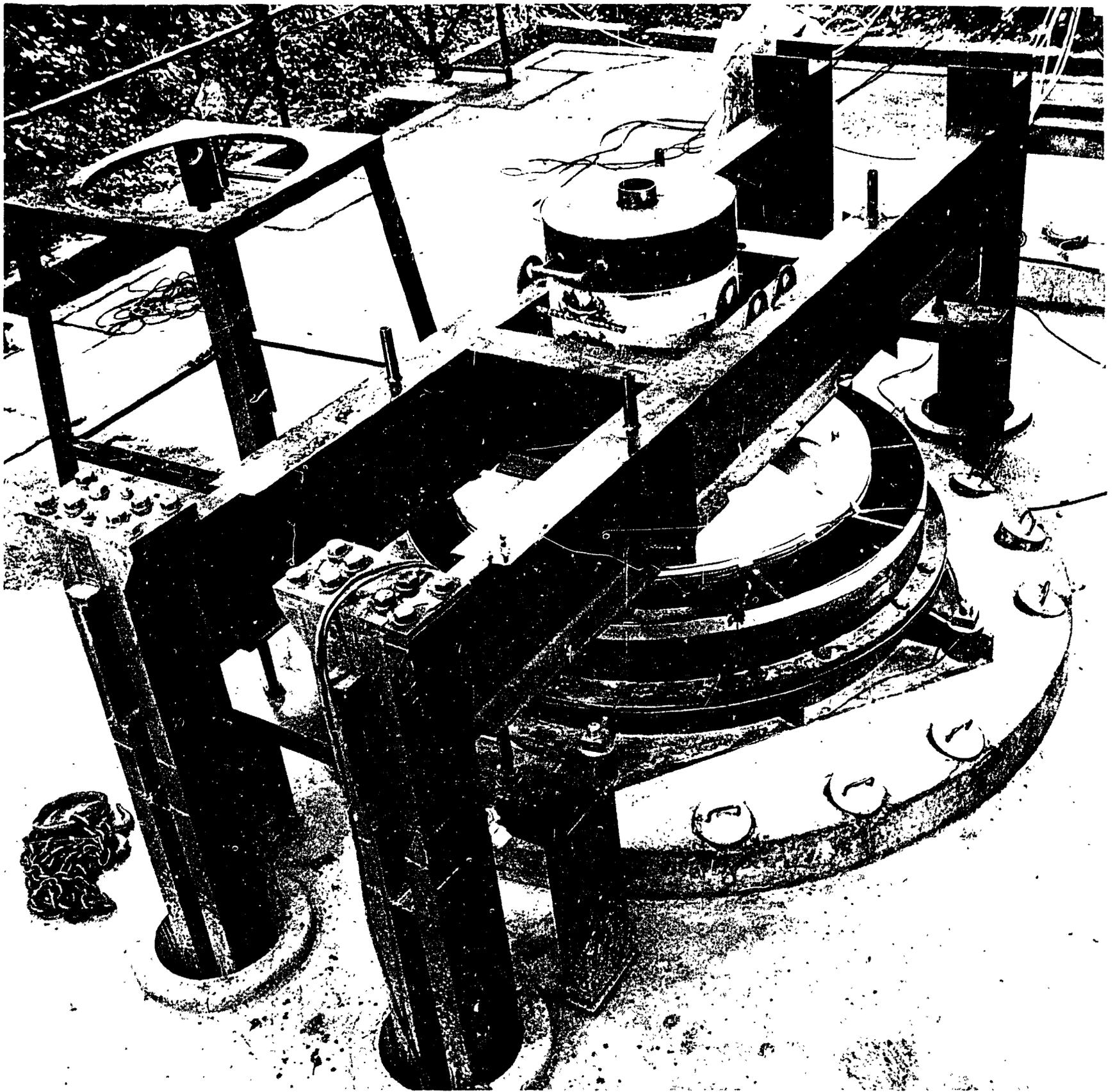


FIGURE III. 2

MAQUETTE DE SURETE

vue de la partie supérieure. On distingue en partant de la droite :

- le massif de béton entourant la cuve dans lequel sont pratiqués 6 canaux recevant les instruments de mesure.
- le bouchon fixe reposant sur une base pentagonale.
- le bouchon tournant revêtu de peinture claire.
- l'étrier de retenue du bouchon tournant.
- la surcharge du bouchon tournant.

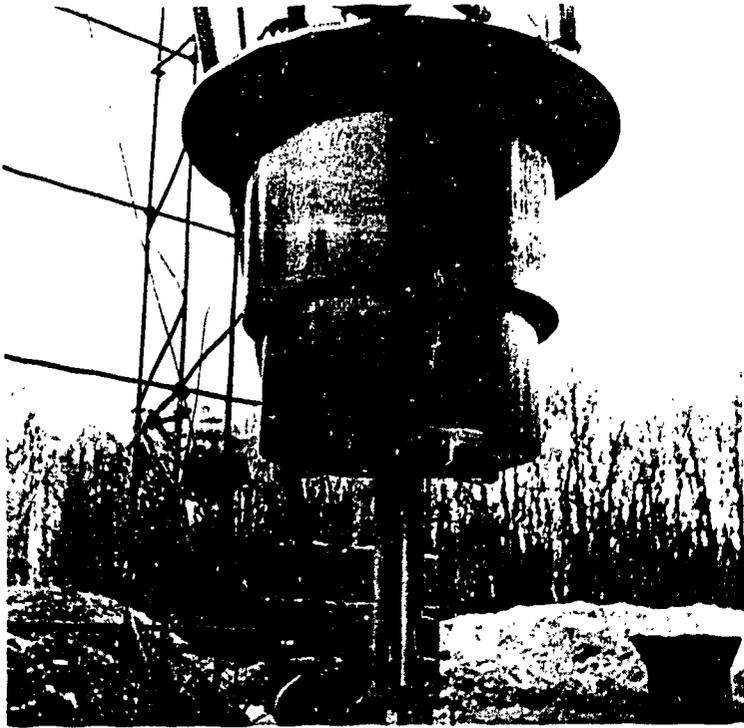


FIGURE III. 3

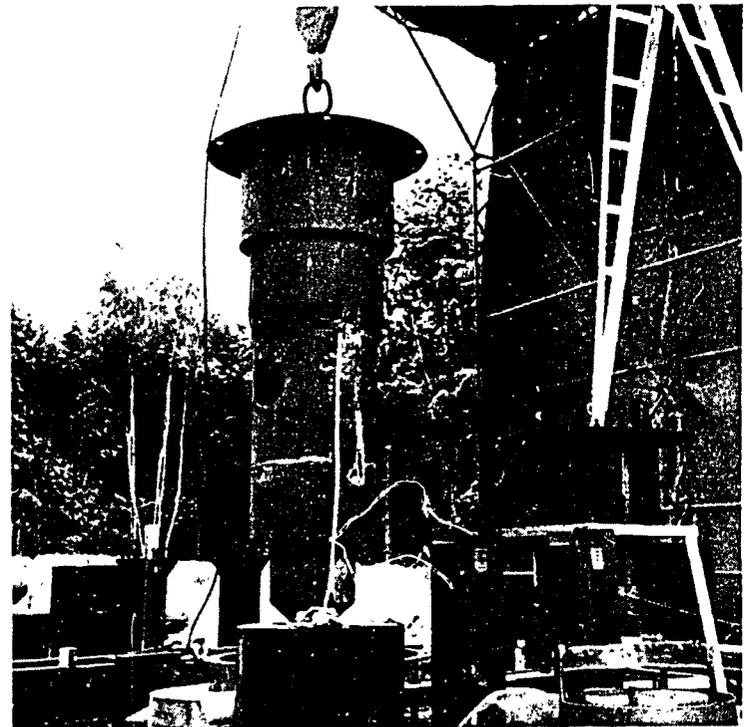
MAQUETTE DE SURETE

Bouchon tournant.

FIGURE III. 4

CUVE D'ETANCHEITE

On distingue l'emplacement des jauges de contrainte collées sur la paroi ainsi que le câble de liaison avec les appareils d'enregistrement.



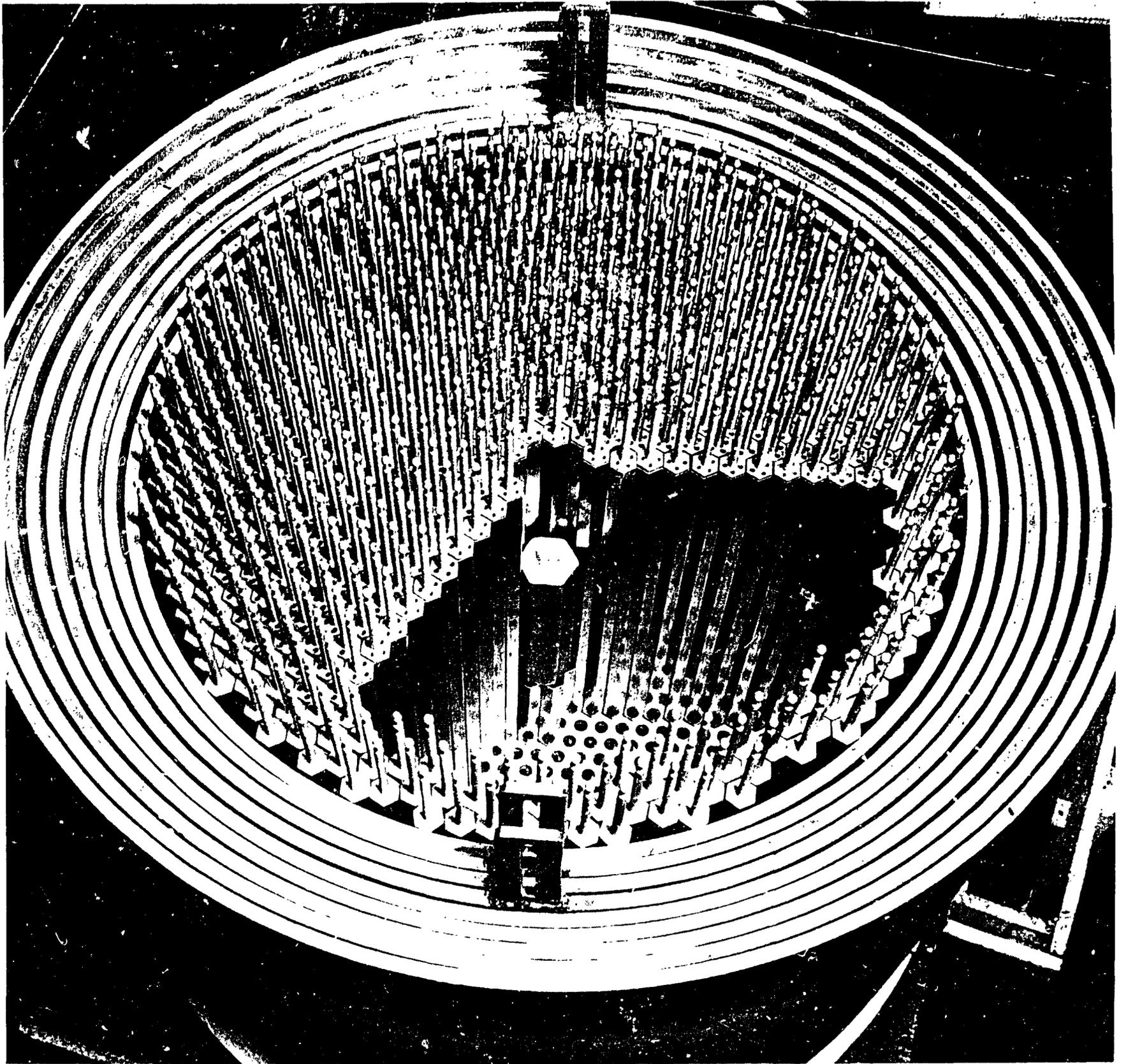


FIGURE III. 5

MAQUETTE DE SURETE

Vue des assemblages (coeur, couverture et réflecteurs) entourés par les viroles d'acier. Une partie des assemblages a été retirée pour montrer le mode de fixation dans le sommier et la disposition d'une charge d'explosif au centre.

FIN