

Le bloc pile du réacteur à haut flux

Par D. COLZY *, G. DUPUY * et J.P. MARTIN*

I. - INTRODUCTION

Parmi les options retenues lors de l'avant-projet et rappelées dans l'article de présentation du réacteur, certaines ont eu des répercussions profondes sur les structures mécaniques :

- le grand nombre de canaux,
- la souplesse recherchée pour autoriser les interventions sur le réacteur, les démontages et la refonte partielle ou totale de l'environnement expérimental,
- l'installation des sources froide et chaude ainsi que du canal β ,
- la pression, la vitesse de circulation et, d'une façon générale, l'utilisation de l'eau lourde,
- le mode de chargement de l'élément combustible,
- l'importance des flux de radiation.

II. - DESCRIPTION

Ce que nous appellerons le bloc-pile, c'est-à-dire l'ensemble constitué par l'élément combustible, le bidon réflecteur contenant l'eau lourde, les canaux qui aboutissent à l'élément combustible et les sources intégrées, est situé dans une protection thermique liquide d'eau légère déminéralisée, constituant une piscine cylindrique de 6 m de diamètre et de 14,5 m de profondeur.

Cette dernière repose au niveau du sol et se trouve centrée dans une double enceinte étanche de soixante mètres de diamètre et trente mètres de hauteur.

Tous les canaux expérimentaux sortent les faisceaux au travers de cette piscine et certains se prolongent au-delà des enceintes étanches (Figure 1).

A. - L'élément combustible (Figure 2)

Les caractéristiques sont rappelées par ailleurs : nous

* Division de Construction des Réacteurs, CEN de Saclay.

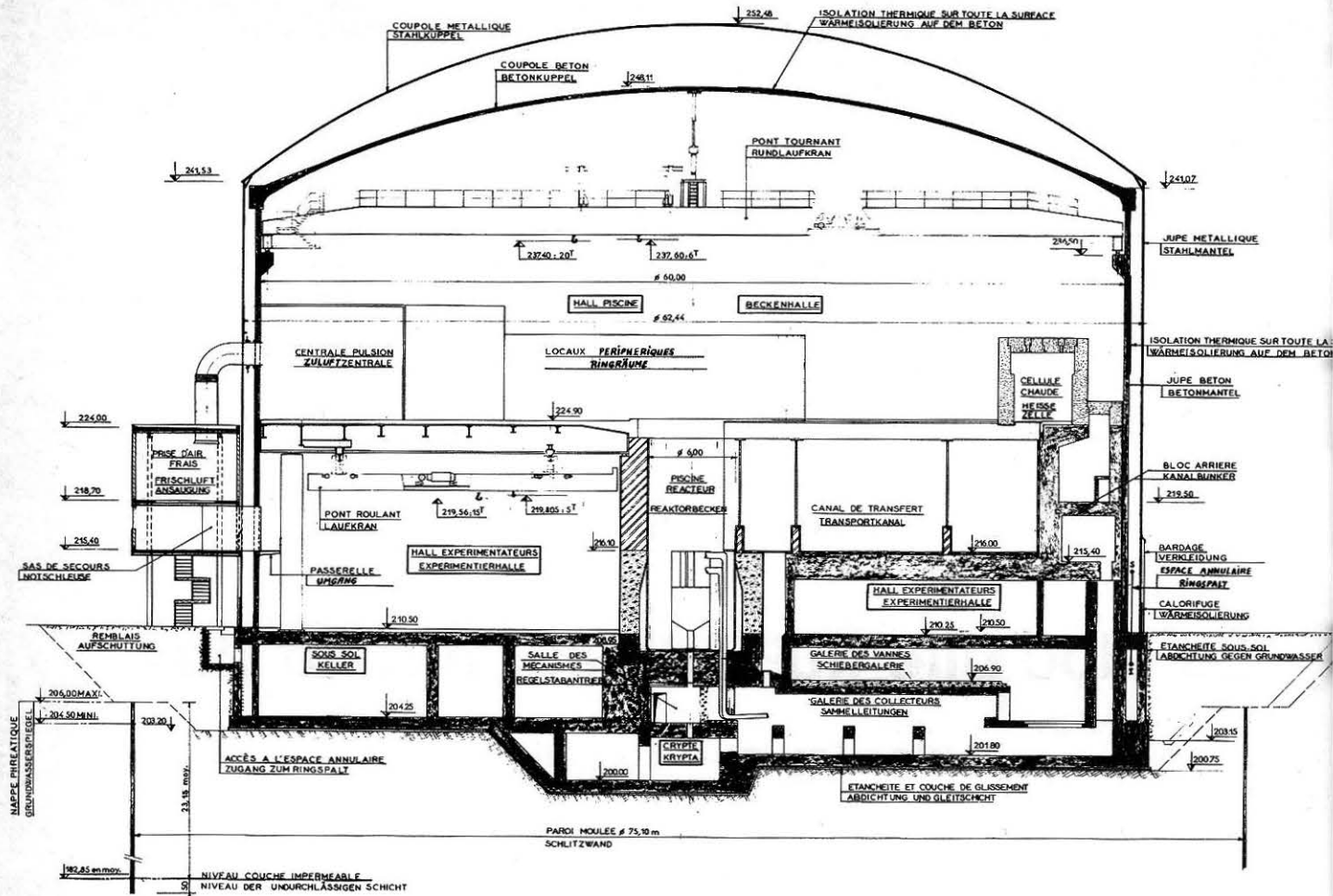


Fig. 1. - Coupe générale du bâtiment réacteur

dirons simplement qu'il est constitué de deux régions concentriques.

La région centrale de 26 cm de diamètre est utilisée pour contrôler le réacteur à l'aide d'une barre de nickel.

La région combustible est représentée par la zone annulaire de 40 cm de diamètre, entourant la région précédente : elle comporte 280 plaques courbées entre deux viroles d'alliage d'aluminium. Sa hauteur est 90 cm, la masse d' U_{235} est de 8,5 kg.

La circulation d'eau lourde, verticale, se fait de haut en bas au travers des plaques : vitesse moyenne : 15,5 m/s., perte de charge : 10bars environ.

L'élément combustible repose sur sa virole centrale ; la partie haute, guidée par une cheminée, comporte trois verrous de sécurité, empêchant son soulèvement intempêtif ; il existe également dans la partie haute une gorge circulaire destinée à recevoir l'outil de manutention.

B. - Le bidon réflecteur (constitué avec de l'alliage d'aluminium, nuance AG3 NET)

Il s'agit essentiellement d'une cuve cylindrique à fond conique fixée au fond de la piscine, de 2,5 m de diamètre intérieur et 30 mm d'épaisseur de paroi. (Figure 3).

En son centre est placé l'élément combustible ; les divers canaux expérimentaux prennent naissance dans le bidon réflecteur et constituent autant de traversées de la virole cylindrique ; c'est au niveau de ces 16 traversées, c'est-à-dire à environ 50 cm de la limite du contour extérieur du bidon, que nous trouvons les joints métalliques d'étanchéité entre l'eau lourde et l'eau légère de la protection thermique.

Le fond conique, d'épaisseur 70 mm, se présente comme un entonnoir et le tube terminal traverse le fond de la piscine de protection thermique, pour déboucher dans une salle située sous la piscine. Ce tube terminal est

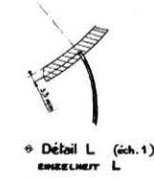
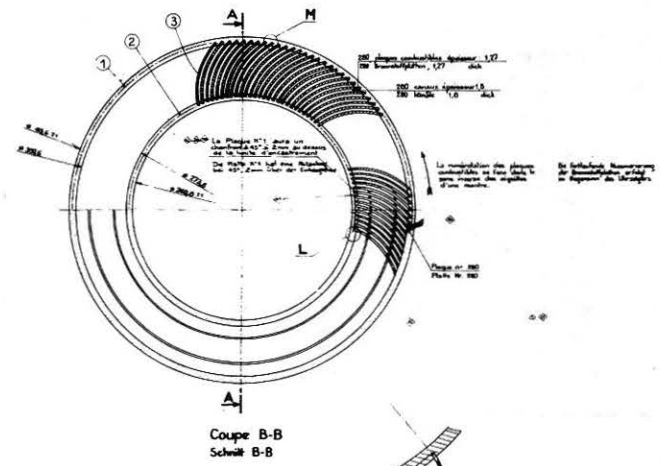
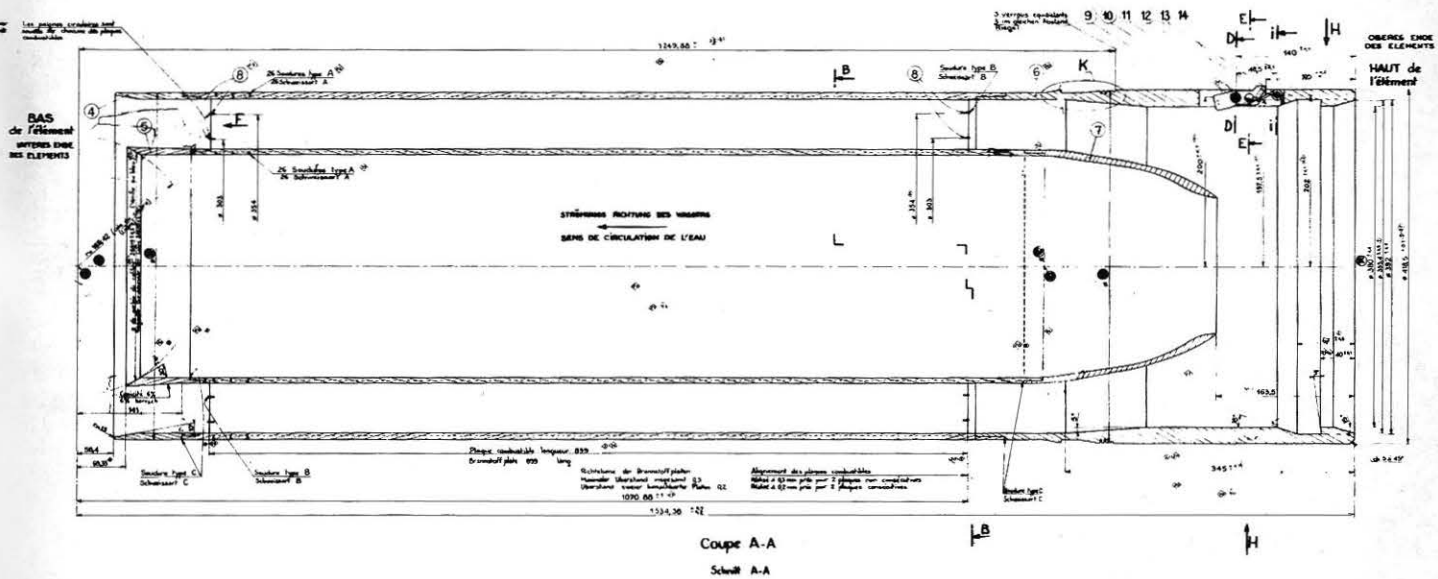


Fig. 2. — Plan de l'élément combustible

destiné à recevoir la tige de commande de la barre de pilotage ; ce fond conique comporte, suivant une génératrice, une protubérance destinée à recevoir le guidage hors réflecteur du canal expérimental bêta.

La liaison mécanique entre le bidon réflecteur et le fond plat de la piscine de protection thermique se fait à la fois par le tube terminal de l'entonnoir et par une jupe cylindrique non étanche, de 2,5 m de diamètre, prolongeant la paroi du réflecteur.

N'oublions pas de mentionner une tuyauterie latérale soudée sous forme de piquage sur le tube terminal de l'entonnoir et destinée à recevoir le débit de refroidissement de la barre de pilotage.

Le couvercle de cette cuve cylindrique est constitué par une pièce complexe appelée bloc tubulaire.

Nous essayerons de la schématiser en énumérant ses différents rôles :

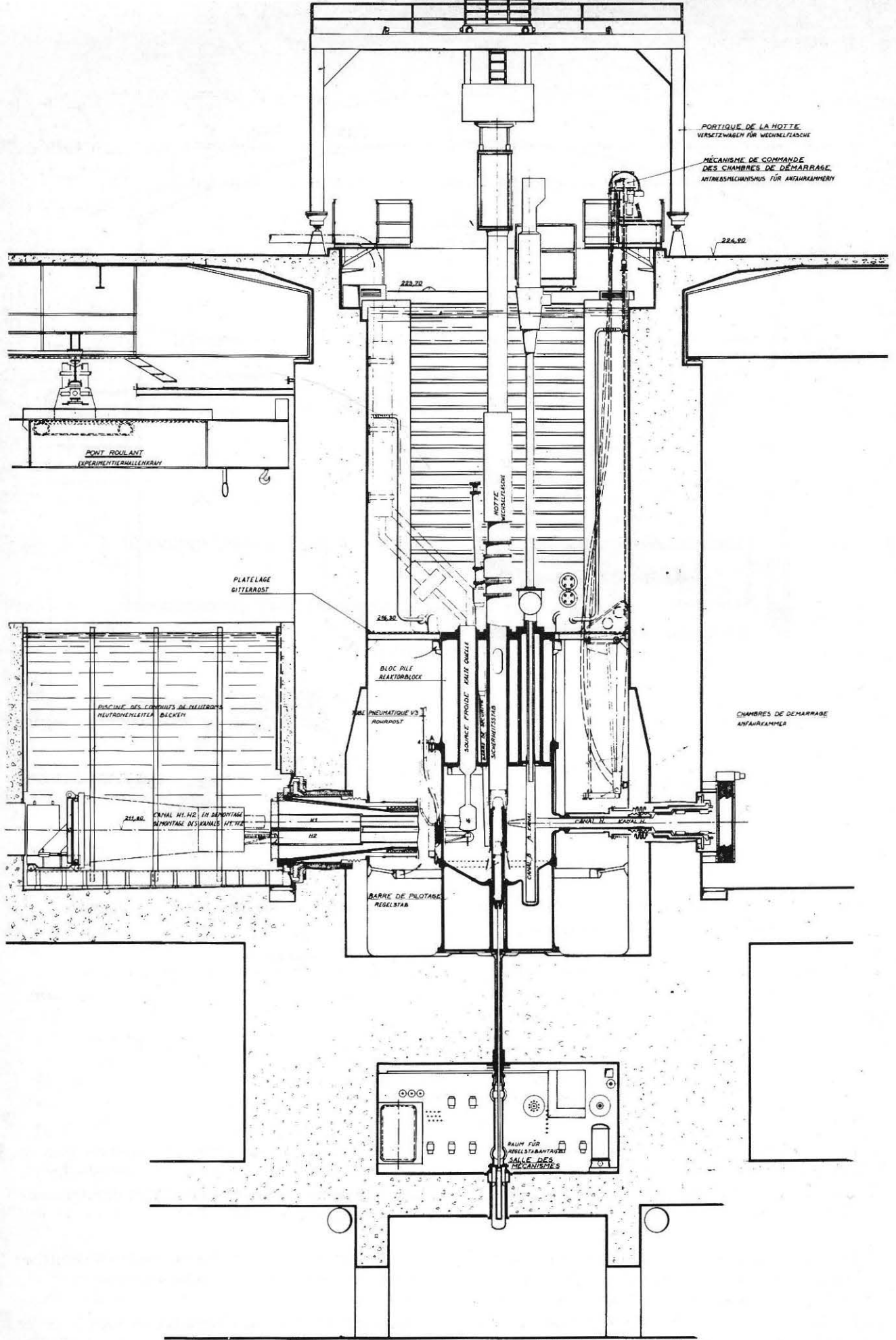


Fig. 3. — Coupe verticale dans le bloc pile

Une plaque de 100 mm d'épaisseur limite le réflecteur et se trouve elle-même limitée en épaisseur par le taux d'échauffement. Tous les efforts dus à la pression sont donc reportés sur une seconde plaque de 120 mm d'épaisseur, située à environ 3 m au-dessus de la première plaque. La hauteur de 3 m a été déterminée pour permettre un accès à sec lorsque le réacteur est arrêté avec une protection d'eau légère, au-dessus du coeur, suffisante.

La liaison entre ces deux plaques est réalisée par l'intermédiaire de tubes entretoises ayant des fonctions particulières et par une virole de diamètre 2,5 m.

Ces tubes entretoises sont :

- celui de la cheminée centrale, de diamètre 470 mm, recevant le débit d'eau lourde de refroidissement ;
- celui du canal bêta de section allongée.

En outre, les brides de liaison entre la cuve cylindrique et le couvercle sont repoussées au dessus de la plaque d'épaisseur 100 mm, afin d'éviter un échauffement excessif du métal : l'étanchéité est réalisée au moyen de joints métalliques.

D'autres fourreaux traversent les deux plaques, tout en n'ayant pas un rôle d'entretoise :

- celui de la source froide, de diamètre 435 mm ;
- celui de la source chaude, de diamètre 316 mm ;
- ceux des barres de sécurité, au nombre de cinq ;
- ceux des tubes d'irradiation V_4 , V_5 , V_6 (dont deux tubes pneumatiques).
- ceux des clapets de convection naturelle, au nombre de quatre.

Enfin, la plaque inférieure comporte également la tuyauterie de sortie d'eau lourde, de 400 mm de diamètre, celle d'entrée étant soudée directement sur la cheminée.

L'ensemble bidon réflecteur comporte divers équipements internes que nous allons énumérer :

Tout d'abord, un porte combustible c'est-à-dire un tube cylindrique servant d'appui à la virole interne de l'élément combustible (l'appui se fait sur une pièce résistante en zircalloy).

Ensuite, un diffuseur servant à orienter les jets d'eau à la sortie des plaques combustibles pour les renvoyer latéralement.

A la grande base du cône existent deux grilles en

série qui transforment l'écoulement violent en une remontée paisible de l'eau lourde (quelques cm/s), moyennant une légère perte de charge.

Accroché à la plaque de 100 mm d'épaisseur, nous trouvons le collecteur de reprise d'eau lourde dans le réflecteur.

Certains dispositifs d'expériences ont été intégrés au bidon réflecteur : nous trouvons en particulier la source froide, la source chaude et le canal bêta, les deux premiers constituant la source de neutrons de divers canaux.

Les tubes, entretoises ou non, cités ci-dessus sont obturés par les dispositifs correspondants sauf pour celui de la cheminée qui comporte une vanne d'étanchéité, spéciale, destinée à permettre le déchargement vertical de l'élément combustible.

Enfin, la cheminée est un tube en nickel de basse teneur en cobalt et destiné d'une part à éviter la criticité lorsque l'élément combustible est déchargé ; d'autre part, à guider la tête de l'élément combustible, le pied de ce dernier reposant précisément sur le porte combustible, le guidage proprement dit étant réalisé par une pièce en zircalloy.

De plus les verrous de l'élément combustible qui viennent s'engager dans une gorge taillée dans la cheminée, empêchent un mouvement vertical ascendant de l'élément en cas d'inversion accidentelle du sens de l'écoulement d'eau lourde.

Le bidon réflecteur est à une pression absolue de 4 bars au niveau du plan médian du coeur ; la pression dans la cheminée, c'est-à-dire à l'amont de l'élément combustible, est de 14,5 bars ; la température maximum de l'eau lourde à l'entrée des plaques est 30° C., celle après les plaques étant de 49,5° C.

C. - Canaux expérimentaux (Figure 4)

Le canal expérimental sert à désigner l'ensemble de l'installation permettant d'extraire du réflecteur le faisceau désiré de neutrons.

Les canaux expérimentaux sont au nombre de 16 dans le réacteur, dont 12 sont dans des plans horizontaux et 4 dans des plans inclinés à 35° vers le haut.

De plus, certains canaux sont groupés dans une même traversée du bidon réflecteur (cas du canal $H_1 H_2$ qui regroupe 10 canaux).

Nous précisons donc leur composition :

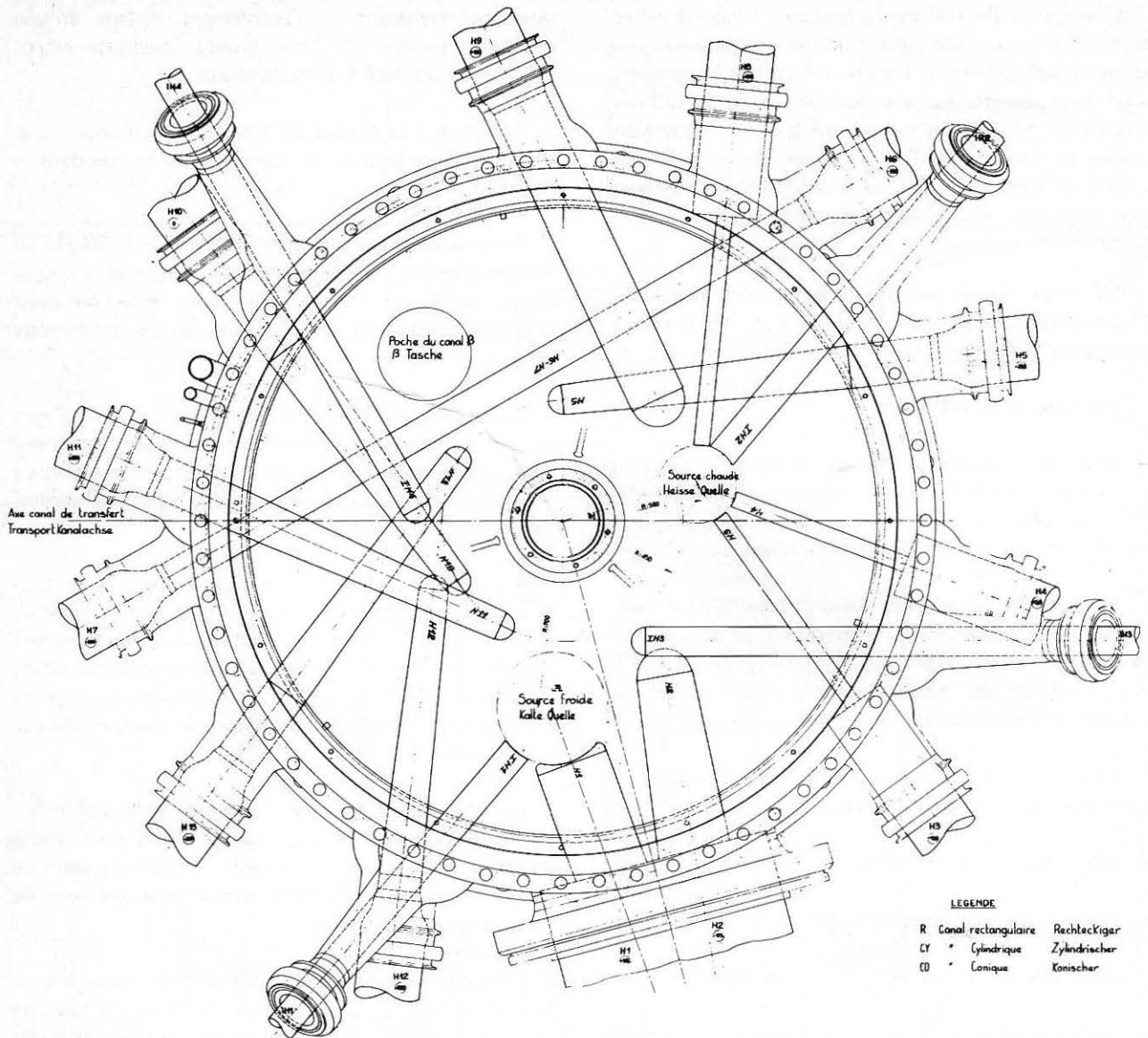


Fig. 4. — Canaux expérimentaux. Implantation des doigts de gant.

	Horizontaux	Inclinés
Canaux visant la source froide	5	1
Canaux visant la source chaude	4	1
Canaux ne visant pas les sources	12 dont	2
	un canal traversier	

SOIT AU TOTAL : 25 CANAUX

Un canal expérimental issu du réflecteur traverse donc la protection thermique en eau légère déminéralisée, puis la protection biologique en béton lourd pour déboucher dans le hall expérimental ; c'est un tube en alliage d'aluminium, rigide, d'un seul tenant et plongeant dans l'eau du réflecteur, dont la bride arrière de fixation se situe dans le hall expérimental. Il a été dénommé doigt de gant. (Figure 5).

La continuité de l'enceinte contenant l'eau lourde est assurée par une virole cylindrique en alliage d'aluminium

venant se raccorder d'une façon étanche sur la bride arrière du doigt de gant, dans le hall expérimental. Cette pièce de liaison a été dénommée manchette.

Toutefois, afin de rendre le montage aisé, il a été nécessaire de prévoir un raccordement étanche de la manchette sur le bidon réflecteur, au moyen de joints métalliques en aluminium pur (type d'étanchéité citée plus haut).

Cette disposition doigt de gant/manchette a permis d'allier une grande rigueur sur la tolérance géométrique du doigt de gant et une certaine souplesse sur la manchette, nécessaire pour des raisons de dilatations thermiques, en intercalant des compensateurs métalliques le long de la manchette.

Diverses solutions ont été adoptées dans cette construction pour faciliter l'exploitation :

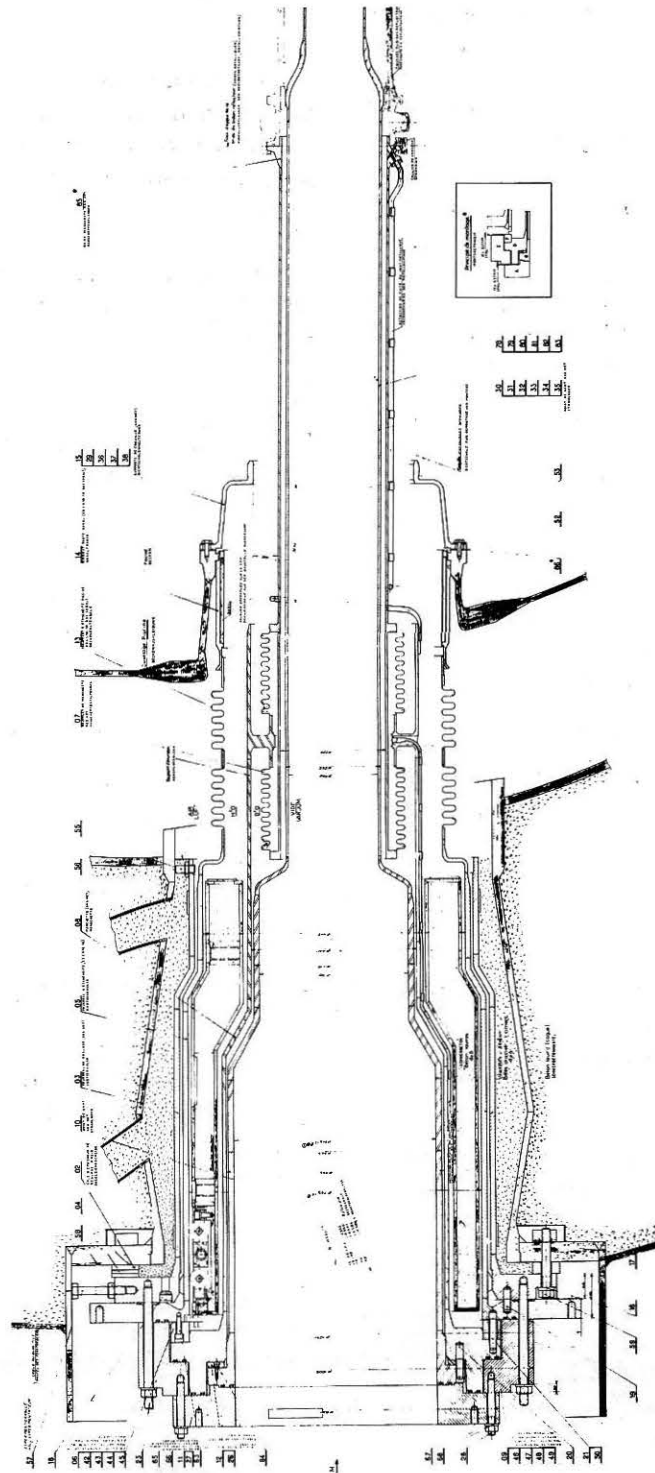


Fig. 5. - Canaux horizontaux. Coupe longitudinale.

- Les joints d'étanchéité métalliques sont démontables à distance, simplement.
- Les étanchéités arrière dans le hall expérimental sont réalisées avec des joints en élastomère, puisqu'ils se trouvent suffisamment loin des rayonnements du coeur ; ces joints peuvent être remplacés sans toucher à la manchette ou aux doigts de gant eux-mêmes.
- Une machine, travaillant à sec dans le hall, permet de remplacer manchette et doigt de gant.
- Chaque joint métallique est doublé par une solution possible de soudure en place.
- Toutes les barrières eau lourde - eau légère, démontables, ainsi que les compensateurs sont doublés, ce qui permet éventuellement d'établir une contre-pression de gaz, mais autorise en permanence le contrôle de l'étanchéité.

Les canaux expérimentaux comportent en outre des protections biologiques, vis-à-vis du personnel se trouvant dans le hall Expérimentation.

Pour un canal, nous distinguons des bouchons annulaires, réalisés en acier inoxydable et en béton lourd et un bouchon destiné aux expérimentateurs.

Ce dernier peut être du type à barillet ou du type à rotors : la distinction porte sur la possibilité d'avoir deux positions de collimateur dans l'un, ou une grande section variable dans l'autre.

Les sources :

Il s'agit de la source chaude et de la source froide : toutes les liaisons sont renvoyées au niveau supérieur de la protection thermique, c'est-à-dire au niveau supérieure de la piscine.

Pour le démontage ou le remplacement des sources, on utilise le principe de la pile piscine ; pour cela, on remplit le bidon réflecteur d'eau légère et l'on travaille normalement sous eau.

Une installation spéciale dite de séchage permet de retirer toute l'eau lourde ou légère avant d'effectuer le changement de nature d'eau : ce dispositif utilise le principe de l'évaporation de l'eau sous vide.

Vannes de sûreté

Les doigts de gant des canaux expérimentaux représentent les structures les plus fragiles, compte tenu de leur échantillonnage minimum et du flux intégré pouvant occasionner des dommages au métal.

Pour éviter une vidange du circuit primaire, ou même de la piscine constituant la protection thermique et afin d'éviter la fusion du coeur, chaque canal est muni d'une vanne de sûreté à ouverture totale, disposée juste après le bouchon expérimentateur et se fermant automatiquement en cas de présence d'eau à l'intérieur du doigt de gant.

La fermeture de une ou plusieurs vannes n'entraîne aucune modification automatique des conditions de fonctionnement du réacteur ; ces vannes sont actionnées par des vérins pneumatiques commandés par des électrovannes.

Certains canaux se prolongent à l'extérieur du réacteur et comportent donc d'autres vannes de sécurité au niveau de l'enceinte étanche du réacteur.

D. - Contraintes mécaniques et thermiques dans le bidon réflecteur et dans les canaux expérimentaux. (Figure 6).

Nous ne pouvons procéder à une énumération fastidieuse des contraintes, aussi préciserons-nous les valeurs pour quelques points essentiels et pour un cas de charge pessimiste.

L'analyse a toujours été effectuée suivant le code A. S. M. E. section III.

Le cas de chargement retenu est celui correspondant au fonctionnement normal, auquel s'ajoute l'injection de cinq barres de sécurité et la fermeture simultanée des vannes principales.

Nous obtenons dans les liaisons :

bidon réflecteur :

$P_m < 2,53 \text{ daN/mm}^2$ (limite admissible : $5,33 \text{ daN/mm}^2$)
 $P_m + Q < 10 \text{ daN/mm}^2$ (limite admissible : 16 daN/mm^2)

bloc tubulaire :

$P_m < 3,49 \text{ daN/mm}^2$ (limite admissible : $5,33 \text{ daN/mm}^2$)
 $P_m + Q < 5,11 \text{ daN/mm}^2$ (limite admissible : 16 daN/mm^2)

En ce qui concerne les canaux expérimentaux, toutes les contraintes sont inférieures aux valeurs ci-dessus, car c'est le critère de stabilité élastique qui a conditionné l'échantillonnage.

Boulonnerie :

En ce qui concerne les pièces servant à fixer les bridages arrière des doigts de gant, nous indiquerons que les chiffres de précontrainte ont été déterminés par l'effort appliqué en cas d'explosion du coeur, ce phénomène ne devant pas amener le décollement des brides.

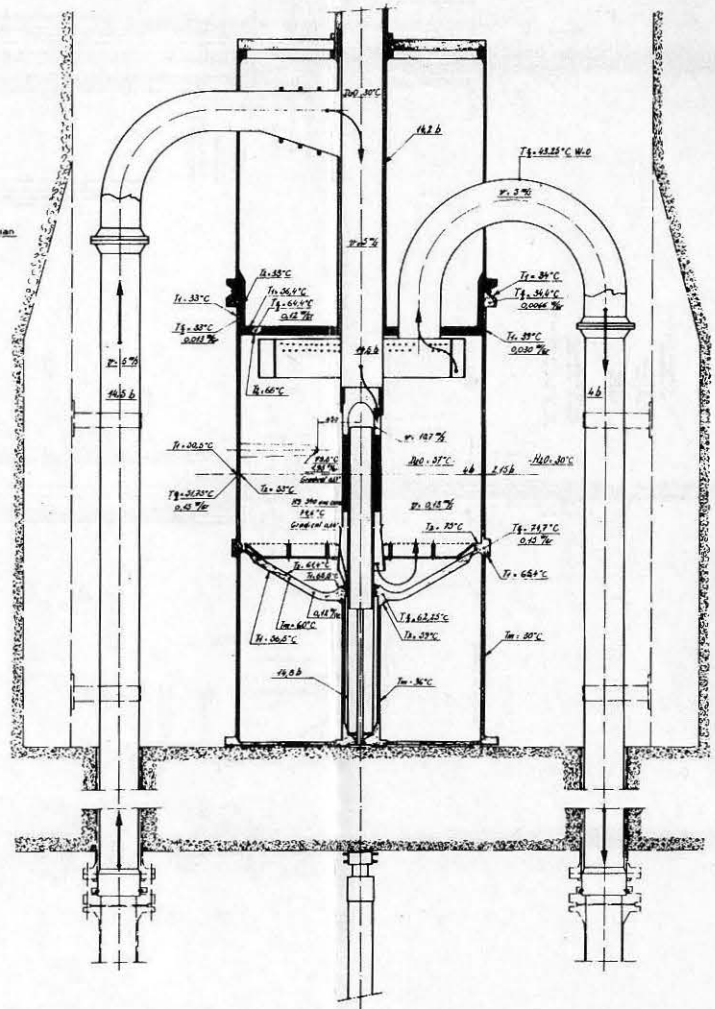
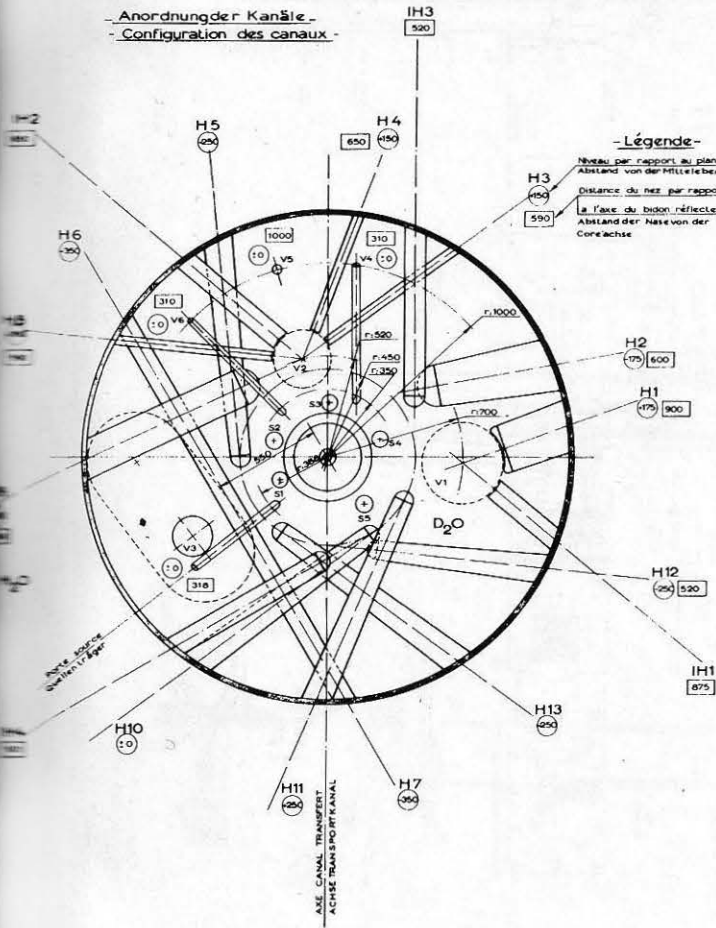


Fig. 6. - Les contraintes dans le bloc pile

$P_m < 8,25 \text{ daN/mm}^2$ (limite admissible : 25 daN/mm^2)
 $P_m + Q < 52 \text{ daN/mm}^2$ (limite admissible : 75 daN/mm^2)

Les phénomènes transitoires tels que variation très rapide de la température de l'eau lourde ou de l'eau légère n'entraînent pas d'augmentation de contrainte appréciable, car les effets supplémentaires dus aux dilatations ou raccourcissements sont compensés par la disparition des contraintes thermiques dues à l'échauffement nucléaire en masse.

E. - Les mécanismes de contrôle et de sécurité du réacteur :

1) - La barre de pilotage : (Figure 2 ci-dessus et Figure 8)

Conception générale et principe de fonctionnement :

Les fonctions que doit remplir la barre de pilotage sont les suivantes :

- a) - Assurer le pilotage du réacteur et la compensation de la combustion de l'élément cœur : la commande de ce mouvement, y compris les moteurs d'asservissement, est doublée.
- b) - Assurer un rôle de sécurité, c'est-à-dire introduire la barre dans le cœur, dans le sens de la montée, sur un signal de baisse de puissance contrôlée.

L'élément absorbant de la barre de pilotage se déplace dans la cavité centrale de l'élément combustible ; le mécanisme de commande est placé dans une salle située sous la piscine : l'accès au mécanisme est possible même pendant le fonctionnement du réacteur.

Description :

L'ensemble de la barre de pilotage comprend un élément absorbant et un chariot de guidage relié par une tige à un mécanisme à vis-écrou d'entraînement. Ce mécanisme est manoeuvré par un boîtier comprenant les engrenages et moteurs nécessaires aux mouvements demandés.

a) — *L'élément absorbant* est fixé sur son chariot : il comprend deux tubes absorbants en nickel (longueur 1 055 et 450 mm) d'épaisseur 6 mm ; les lames d'eau nécessaires au refroidissement sont prévues soit par utilisation de la virole interne de l'élément combustible, soit par deux tubes en alliage d'aluminium concentriques.

La température maximum dans le nickel serait de 90° C pour un débit de refroidissement de 50 m³/h, sous une perte de charge de 0,12 bar. En pratique, le débit sera de 80 m³/h environ. Le chariot porte-élément est en alliage d'aluminium : les galets de guidage et leurs axes sont en alumine frittée.

b) — *Mécanisme de la barre de pilotage.* La tige de poussée raccorde l'élément absorbant et son chariot (solidaires l'un de l'autre) au mécanisme de commande situé sous la piscine, en air.

La partie supérieure de la tige se raccorde sur le chariot au moyen d'un verrou à billes. La partie inférieure se raccorde sur la vis du système vis-écrou.

Le verrou est commandé de la salle des mécanismes avec un outil spécial actionnant une tringle coulissant dans la tige de poussée ; c'est un dispositif classique.

Il reste donc deux étanchéités :

- La première autour de la tige de poussée pour empêcher que l'eau lourde ne passe en salle des mécanismes : elle est constituée par des joints d'étanchéité RINGTEF, formant barrages. On effectue successivement entre les joints la reprise de fuite, l'injection de gaz la récupération de fuite.
- La seconde entre la tringlerie de déverrouillage et la tige de poussée : vu la faible course, on utilise un soufflet de dilatation soudé sur l'une et l'autre pièces.

Le mécanisme vis-écrou :

C'est une vis à billes classique.

Nous trouvons enfin un carter rigide servant de support à l'ensemble de la barre de pilotage et le mécanisme de mouvement fixé au sol ; le carter supérieur sert également d'étanchéité vis-à-vis d'une pollution éventuelle d'eau lourde tritiée.

Les deux moteurs d'entraînement commandent les systèmes de pignon par l'intermédiaire chacun d'un

embrayage électromagnétique ; l'un de ces derniers est en service, l'autre coupé.

Le moteur de sécurité comporte lui aussi un embrayage électromagnétique.

Nous trouvons également les dispositifs classiques de recopie.

Le dispositif d'équilibrage :

Le rôle de ce dispositif est double :

- d'une part, équilibrer le poids de la barre et de la pression de l'eau lourde s'exerçant sur la section de la tige de poussée ;
- d'autre part, assurer une sécurité sur la vitesse d'extraction de la barre de pilotage en cas de rupture de l'écrou à billes.

La réalisation est la suivante :

Un piston est fixé à l'extrémité de la tige de poussée. Ce piston coulisse dans un cylindre, lui-même placé à l'intérieur d'un réservoir d'air comprimé. Le cylindre est plein d'huile, ainsi que le bas du réservoir : la communication se fait au moyen d'un gicleur.

La pression d'air comprimé est réglée pour équilibrer le mouvement avec une légère résultante vers le haut ; le gicleur limite la vitesse de descente de la barre à 6 mm/s. soit 150 pcm/s., en cas de rupture de l'écrou à billes et perte de la pression d'air comprimé.

Les performances de la barre sont les suivantes :

- Pilotage normal et secours : maximum de vitesse ± 2 mm/s. $\pm 10\%$
- Voie de sécurité : 6 mm/s.

2) - Les barres de sécurité :

Conception générale et disposition sur le réacteur (Figure 9).

Au nombre de cinq, les barres de sécurité sont légèrement inclinées sur la verticale (10 degrés maximum) autour du coeur de façon que les éléments absorbants viennent frôler l'élément combustible en position basse.

Elles sont propulsées par air comprimé, les éléments absorbants étant dans l'eau lourde, tandis que la partie du mécanisme assurant le mouvement émerge du bidon réflecteur et baigne dans l'eau légère de la piscine (Figures 10 et 11).

Les circuits d'alimentation électrique et pneumatique

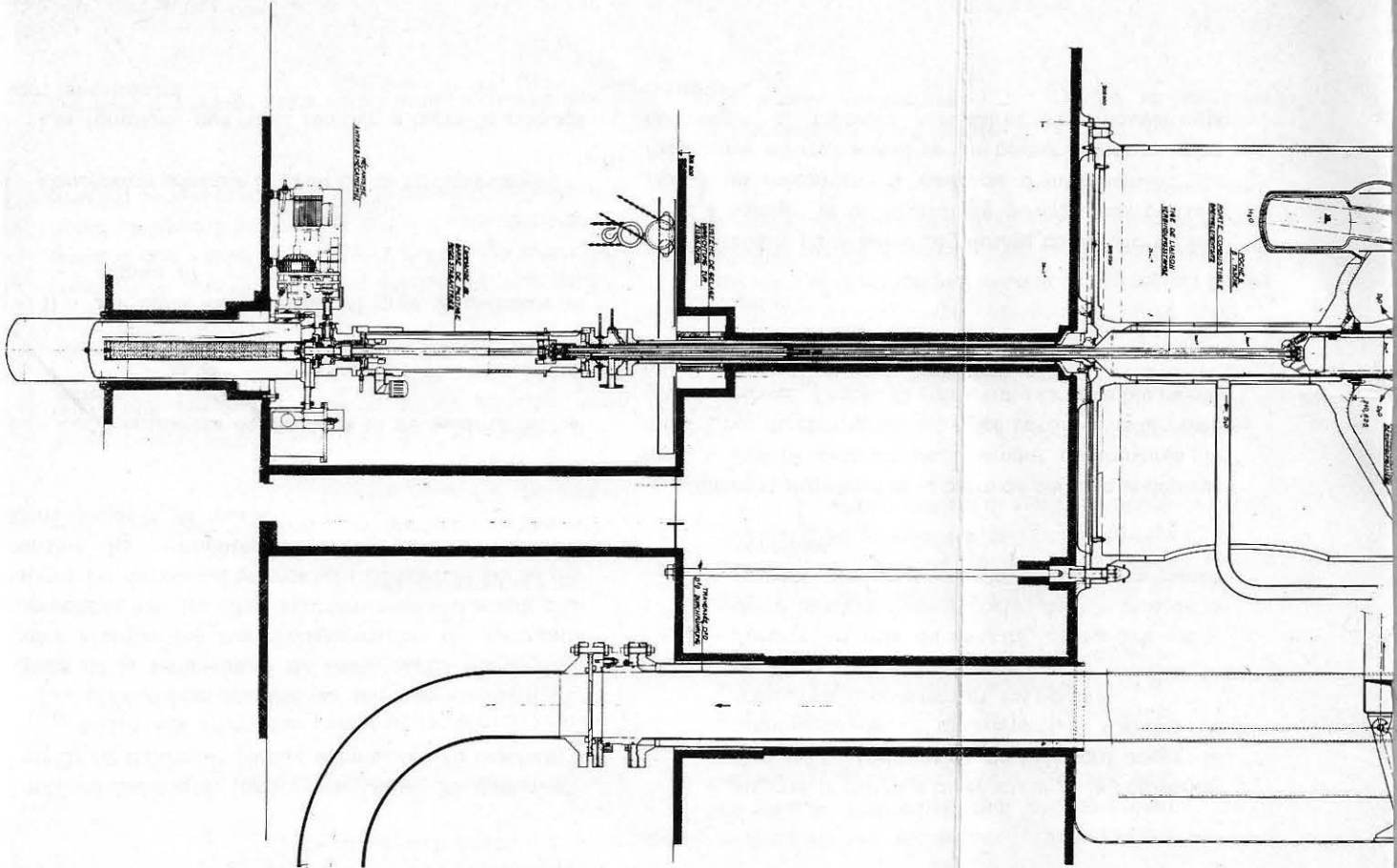


Fig. 7. — Ensemble du bloc pile

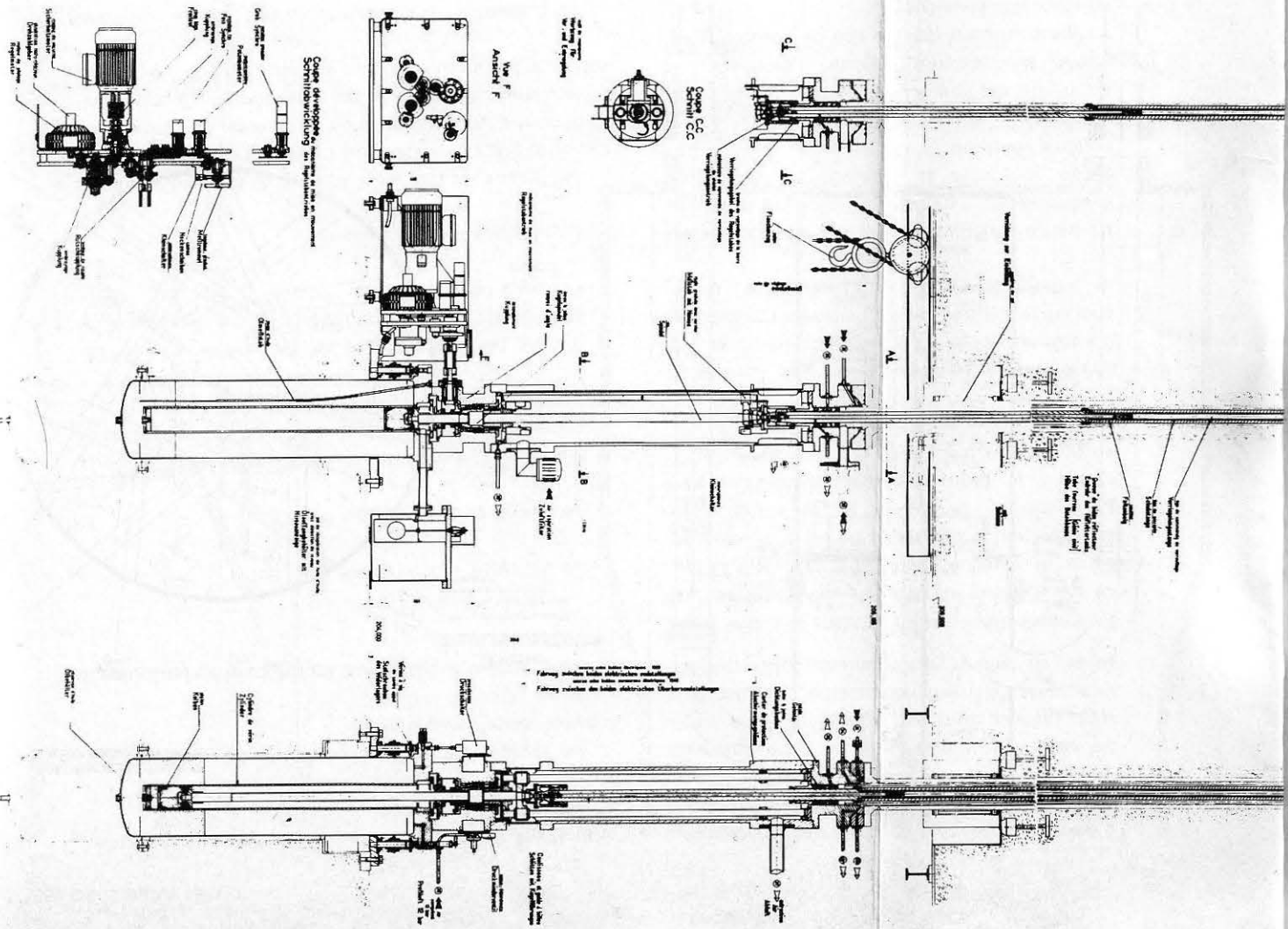


Fig. 8. — Barre

du mécanisme cheminant dans l'eau légère de la piscine et aboutissent au niveau supérieur de la piscine.

La barre, maintenue en position haute lors du fonctionnement, est constamment sollicitée vers le bas sous l'effet d'une réserve d'air comprimé. Elle reste accrochée en position haute malgré cette sollicitation, par l'intermédiaire d'un électroaimant qui, par manque de courant provoque la propulsion des barres.

Description sommaire :

Nous décrivons d'abord l'élément absorbant : c'est un tube constitué d'un alliage argent-indium-cadmium, de diamètre 100 mm, d'épaisseur 4 mm et de longueur 2 000 mm. Il est gainé de façon étanche par un procédé électrolytique utilisant le nickel, afin de le protéger de la corrosion due à l'eau lourde.

Il s'assemble sur l'organe de manoeuvre, par un dispositif d'accrochage à baïonnette, muni des verrouillages nécessaires.

On trouve encore, du côté eau lourde, le dispositif d'amortissement qui comporte un piston refoulant l'eau lourde au travers d'orifices calibrés en fin de course de propulsion ; ce piston fait partie d'un tube en alliage d'aluminium prolongeant le tube absorbant et guidé au moyen de roulettes dans un tube fixe.

Le piston d'amortissement se termine en position supérieure par la tige de traversée dans une boîte étanche séparant l'eau lourde de l'air du vérin de commande.

Description de l'organe de manoeuvre :

Ce dernier comprend :

- un vérin pneumatique de lancement ;
- un électroaimant d'accrochage ;
- un amortisseur sec de secours et certains accessoires tels que fin de course, détecteur de présence d'eau au-dessus de la traversée étanche.

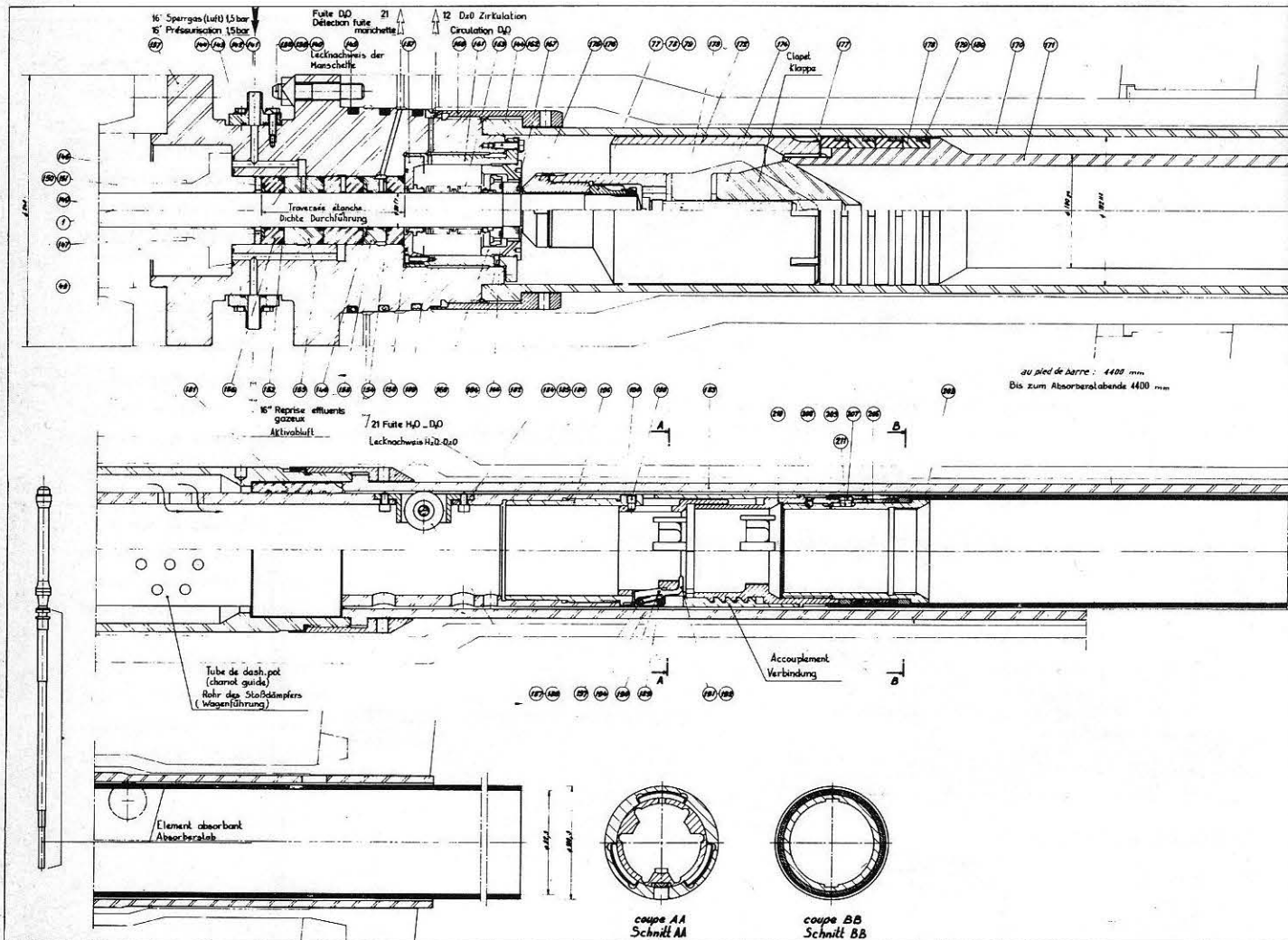


Fig. 11. — Barre de sécurité, partie inférieure.

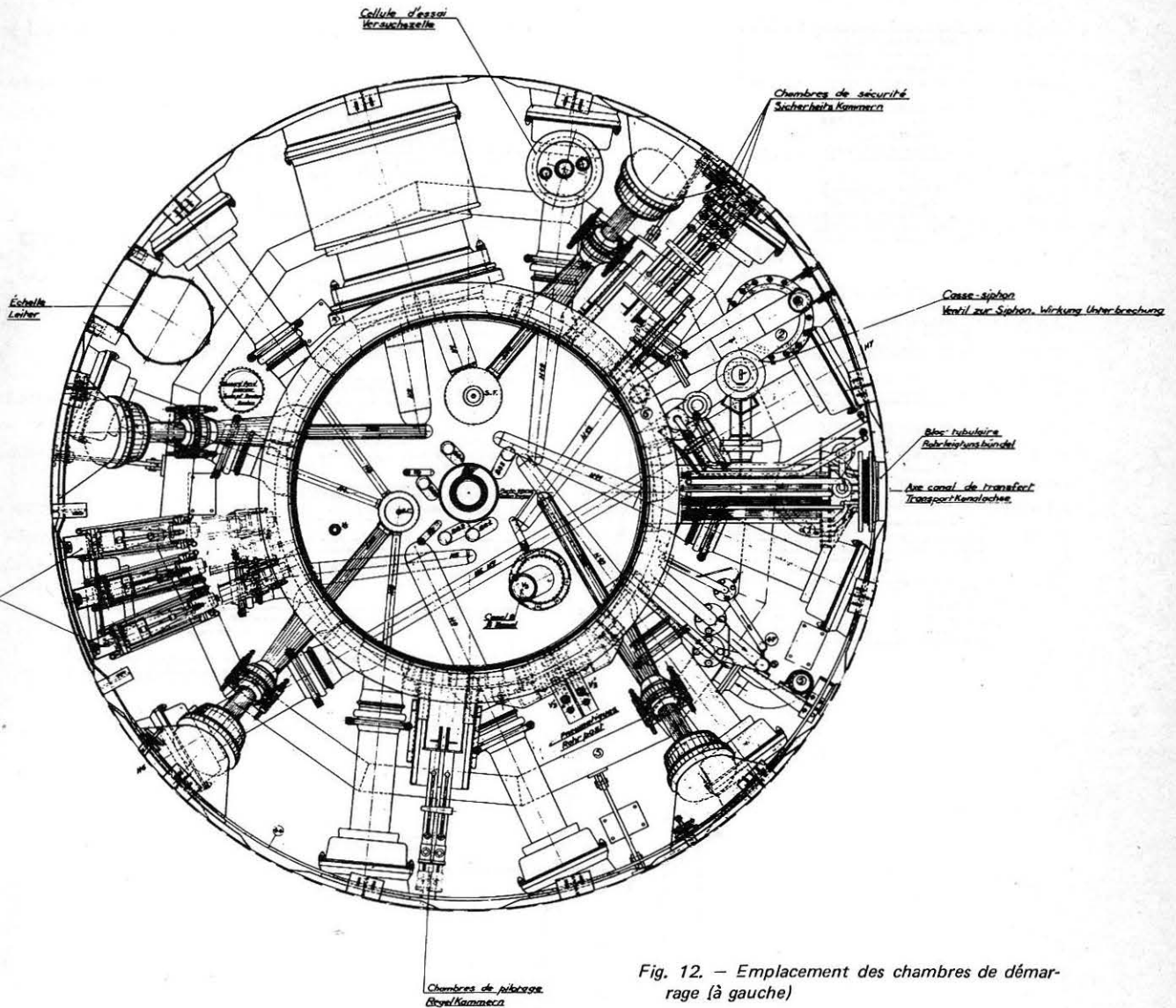


Fig. 12. — Emplacement des chambres de démarrage (à gauche)

Traversée étanche :

Elle constitue la séparation entre l'eau lourde du réacteur et la chambre à air inférieure du vérin de lancement.

Elle est constituée par une série de joints toriques entre lesquels se fait la reprise des fuites éventuelles en séparant dans toute la mesure du possible les fuites d'eau lourde et celles de l'eau légère ou de l'air comprimé.

Une pressurisation entre les deux bagues toriques supérieures interdit toute rentrée d'eau vers le vérin pneumatique.

Performances de la barre :

- le temps de chute maximum est de 0,23 seconde pour une course de 800 mm ;
- la vitesse de remontée est de 12 mm/s. environ ;

- durée de vie : du fait du changement de composition de l'alliage sous irradiation, il est envisagé actuellement le remplacement de ces absorbants tous les deux ans environ (10^{22} n/cm² intégrés).

3) - Les chambres de démarrage (Figure 12)

Elles sont situées hors du bidon réflecteur, sensiblement dans le plan médian du cœur et dans la piscine, c'est-à-dire dans l'eau légère de la protection.

Au nombre de trois, elles sont situées chacune dans un container amovible étanche, posé sur une balancelle reliée à la margelle par une tringlerie. Un système moto-réducteur électrique assure le déplacement de la tringlerie.

En outre, le container comporte à la partie avant un blindage de plomb.

Les trois chambres ont des mouvements indépendants (Figure 13).

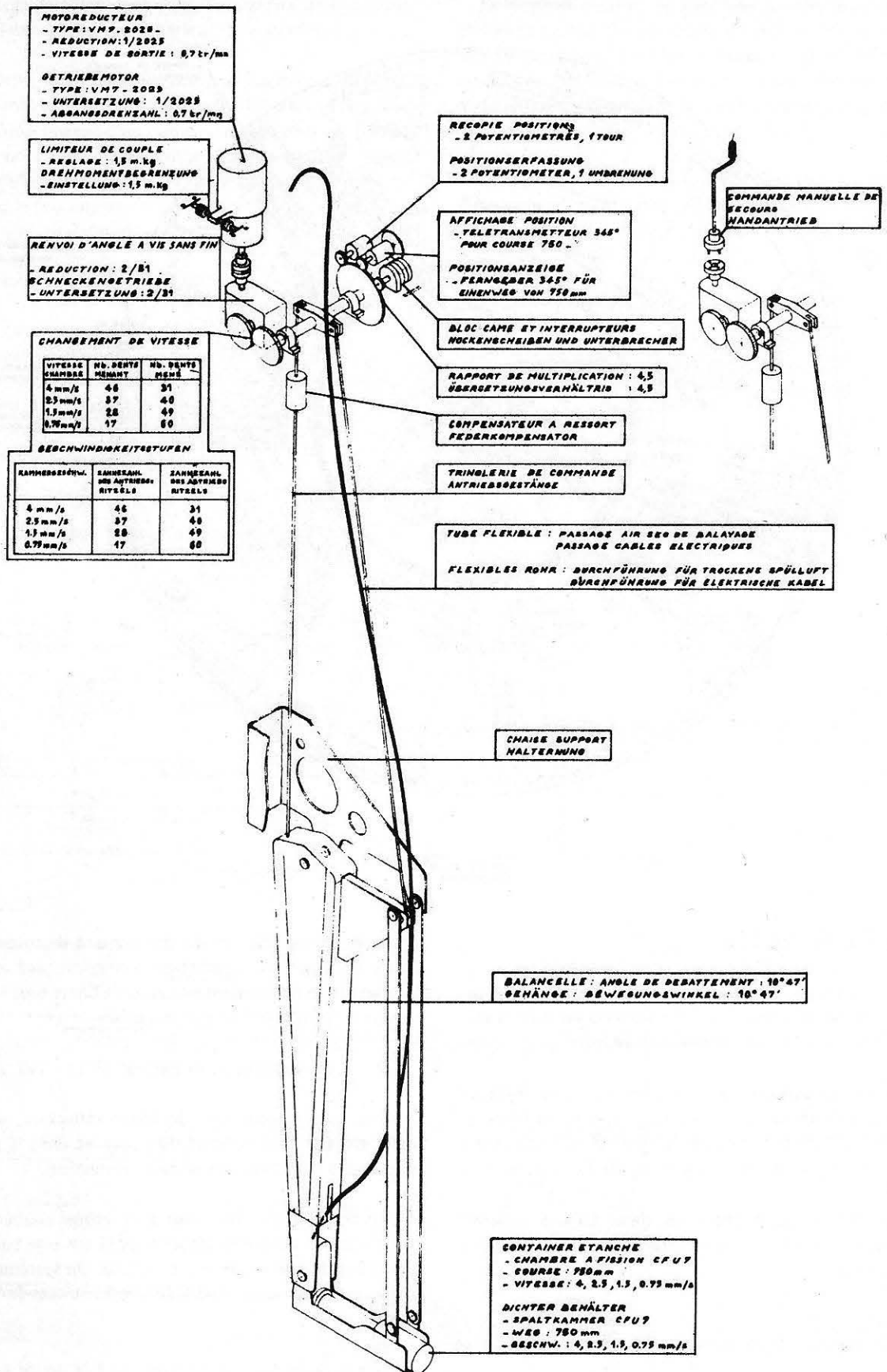


Fig. 13. - Commande des chambres de démarrage.

4) - Les chambres de sécurité et de pilotage

Il existe deux chambres de pilotage et trois chambres de sécurité ; elles sont situées dans des containers étanches, comportant un écran de plomb comme précédemment, et approximativement dans le plan médian du coeur.

Ces chambres sont manoeuvrables au moyen d'une perche sur un tabouret support, mais leur mouvement n'est pas motorisé.

F - Les aménagements de la piscine :

Ils comportent :

- Un circuit de refroidissement dont la crépine d'arrivée se situe à 2 m au-dessus du fond de la piscine et une crépine de reprise située en partie haute au-dessus du

bloc tubulaire, c'est-à-dire à mi-hauteur de la piscine.

- Un circuit couche chaude situé à la partie supérieure de la piscine.
- Un platelage d'accès situé au niveau de la plaque supérieure du bloc tubulaire et constituant la limite d'accès du personnel, réacteur arrêté et l'eau affleurant les plaques du platelage.
- Enfin, un plongeur en partie supérieure, hors d'eau et constituant une plate-forme d'accès pour les mécanismes de la hotte de déchargement et du canal expérimental bêta.
- La température de l'eau légère de la piscine est maintenue en dessous de 35° C., celle de la couche chaude étant maintenue à 4° C. au-dessus de celle de la piscine.