

PREMIER MINISTRE  
COMMISSARIAT A  
L'ÉNERGIE ATOMIQUE

C E A - R 2693

**DEVELOPPEMENT DES REACTEURS A GRAPHITE  
ET URANIUM NATUREL**

par

Jean BOURGEOIS

COMMISSARIAT A L'ENERGIE ATOMIQUE

Boris SAITCEVSKY

ELECTRICITE DE FRANCE

**Rapport C E A - R 2693**

Genève 1964, A Conf. 28/P/36

**1964**  
Ba

CENTRE D'ÉTUDES  
NUCLÉAIRES DE SACLAY

CEA-R 2693 - BOURGEOIS Jean, SAITCEVSKY Boris,

DEVELOPPEMENT DES REACTEURS A GRAPHITE ET URANIUM NATUREL.

Sommaire. -

Le programme français de centrales à graphite et uranium naturel s'est développé - d'EDF 1 à EDF 4 - dans la voie d'un accroissement de la puissance unitaire des installations, de la puissance spécifique et de la puissance volumique, et d'une amélioration des conditions de sécurité de fonctionnement. La puissance élevée d'EDF 4 (500 MWe) et l'intégration du circuit primaire dans le caisson, lui-même en béton précontraint permettent ainsi de tirer le meilleur parti des éléments combustibles tubulaires utilisés dès EDF 1, et d'arriver ainsi à une solution très satisfaisante.

L'emploi d'un élément combustible refroidi intérieurement (élément annulaire) permet de faire un nouveau pas en avant : il devient alors possible d'augmenter la pression du gaz de refroidissement sans craindre le fluage du tube d'uranium. L'emploi d'un caisson en béton précontraint permet une telle ./.

---

CEA-R 2693 - BOURGEOIS Jean, SAITCEVSKY Boris,

DEVELOPMENTS IN NATURAL URANIUM - GRAPHITE REACTORS.

Summary. -

The French natural uranium-graphite power-reactor programme has been developing - from EDF 1 to EDF 4 - in the direction of an increase of the unit power of the installations, of the specific and volume powers, and of an improvement in the operational security conditions. The high power of EDF 4 (500 MWe) and the integration of the primary circuit into the reactor vessel, which is itself made of pre-stressed concrete, make it possible to make the most of the annular fuel elements already in use in EDF 1, and to arrive thus at a very satisfactory solution.

The use of an internally cooled fuel element (an annular element) has led to a further step forward : it now becomes possible to increase the pressure of the cooling gas without danger of causing creep in the uranium tube. The use of a pre-stressed concrete vessel makes this pressure increase possible, ./.

augmentation de pression, et l'intégration du circuit primaire élimine les risques d'une dépressurisation rapide qui aurait présenté dans ce cas un risque majeur.

On aborde dans ce rapport les principaux problèmes posés par ce nouveau type de centrale et on indique les grandes lignes des recherches et études effectuées en France :

- Les études de neutronique et thermique ont permis d'envisager l'emploi d'éléments combustibles de grandes dimensions (diamètre interne = 77 mm, diamètre externe = 95 mm), tout en conservant l'uranium naturel.

- Les problèmes de fabrication de ces éléments, et de leur comportement en pile, font l'objet d'un programme important, tant hors pile que dans les piles de puissance (EDF 2) et les piles d'essais (Pégase).

- L'augmentation des dimensions du combustible conduit à un pas du réseau très important (35 à 40 cm). On peut alors envisager de disposer d'un trou de chargement par canal ou pour un petit nombre de canaux, que les ma- ./.

---

and the integration of the primary circuit avoids the risk of a rapid depressurization which would be in this case a major danger.

This report deals with the main problems presented by this new type of nuclear power station, and gives the main lines of research and studies now being carried out in France.

- Neutronic and thermal research has made it possible to consider using large size fuel elements (internal diameter = 77 mm, external diameter = 95 mm) while still using natural uranium.

- The problems connected with the production of these elements and with their in pile behaviour are the subject of a large programme, both out of pile and in power reactors (EDF 2) and test reactors (Pégase).

- The increase in the size of the element leads to a large lattice pitch (35 to 40 cm). This makes it possible to consider having one charging aperture per channel or for a small number of channels, whether the charge machine be inside or outside the pressure vessel. ./.

CEA-R 2693 - Suite 3

chines de chargement soient placées à l'intérieur ou à l'extérieur du caisson.

En conclusion on donne les principales caractéristiques d'un projet de centrale de 500 MWe utilisant un tel élément combustible. On compare en particulier un tel projet à la centrale EDF 4, afin de mettre en évidence les gains que peuvent apporter de tels développements à la filière gaz-graphite et uranium métallique naturel, dont les plus importants sont : le doublement de la puissance spécifique et de la puissance volumique, et la réduction d'un facteur 3 du nombre de canaux.

Les études en cours permettront de préciser l'importance de la réduction sur le montant des investissements qui sera apportée par ces progrès techniques importants.

---

1964 - Commissariat à l'Energie Atomique - France

24 p.

CEA-R 2693 - Suite 3

In conclusion are given the main characteristics of a project for a 500 MWe power station using such a fuel element. In particular this project is compared to EDF 4 in order to show the advantages resulting from such developments in gas-graphite natural metallic uranium reactor systems ; these are : a doubling of the specific and volume powers, and a three-fold reduction in the number of channels.

The research now under way will make it possible to calculate the reduction in capital costs which will result from these important technical advances.

1964 - Commissariat à l'Energie Atomique - France

24 p.

*Les rapports du COMMISSARIAT A L'ENERGIE ATOMIQUE sont, à partir du n° 2200, en vente à la Documentation Française, Secrétariat Général du Gouvernement, Direction de la Documentation, 16, rue Lord Byron, PARIS VIIIème.*

*The C.E.A. reports starting with n° 2200 are available at the Documentation Française, Secrétariat Général du Gouvernement, Direction de la Documentation, 16, rue Lord Byron, PARIS VIIIème.*

## DEVELOPPEMENT DES REACTEURS A GRAPHITE ET URANIUM NATUREL

par

Jean BOURGEOIS, Chef du Département des Etudes de Piles au  
COMMISSARIAT A L'ENERGIE ATOMIQUE

Boris SAITCEVSKY, Chef du Service d'Etudes Générales Nucléaires  
à l'ELECTRICITE DE FRANCE

1° - Le programme français de centrales à graphite et uranium naturel s'est développé - d'EDF 1 à EDF 4 - dans la voie d'un accroissement de la puissance unitaire des installations, de la puissance spécifique et de la puissance volumique, et d'une amélioration des conditions de sécurité de fonctionnement. La puissance élevée d'EDF 4 (500 MWe) et l'intégration du circuit primaire dans le caisson, lui-même en béton précontraint permettent ainsi de tirer le meilleur parti des éléments combustibles tubulaires utilisés dès EDF 1, et d'arriver ainsi à une solution très satisfaisante et qui, sauf imprévu, devrait être compétitive avec les centrales thermiques classiques dans les conditions françaises.

2° - Cependant, le C.E.A. et l'E.D.F. estiment que les possibilités ultimes de la filière uranium naturel-graphite-gaz ne sont pas atteintes avec EDF 4. Dans ce qui suit une solution jugée très prometteuse, basée sur l'utilisation d'un élément annulaire refroidi intérieurement et extérieurement est développée.

3° - Ce type de réacteur fait l'objet, actuellement en France, d'un programme important d'études et de développement. Il est possible que cette nouvelle variante de réacteur de puissance de la filière française se substitue, après le succès d'une première réalisation, dans un avenir peu éloigné, aux réacteurs du type EDF 4.

## Développement des réacteurs à graphite et uranium naturel de G 2 à EDF 4

4° - Les premiers réacteurs français à graphite et uranium naturel, refroidis par du gaz carbonique sous pression, G 2 et G 3 produisent de l'électricité bien que conçus essentiellement comme des réacteurs plutonigènes. Ils présentaient à l'époque où ils furent construits deux aspects originaux : un dispositif permettant la manutention du combustible sans arrêter le réacteur et un caisson en béton précontraint [1]. Le fonctionnement satisfaisant de ces réacteurs en service, le premier depuis 1959, le second depuis 1960, et en particulier l'excellent comportement du caisson en béton, ont depuis confirmé l'intérêt de ces techniques qui sont maintenant adoptées dans la plupart des centrales à graphite refroidies à gaz construites en France comme à l'étranger.

5° - Sur les unités purement industrielles l'EDF et le CEA se sont attachés, d'EDF 1 à EDF 4, à développer progressivement des techniques permettant à la fois de réduire le coût de l'électricité produite et d'accroître la sécurité de fonctionnement des installations [2]. De façon très schématique - nous aurons l'occasion de revenir sur d'autres aspects dans les chapitres suivants - chaque centrale est marquée par l'introduction d'une ou deux techniques nouvelles qui seront pleinement exploitées par la suite.

6° - EDF 1, actuellement en service, est la première centrale utilisant un élément combustible tubulaire refroidi extérieurement, de diamètre intérieur 14 mm et extérieur 35 mm. L'emploi de tubes pose des problèmes de fabrication qui se sont révélés relativement faciles à surmonter, et un problème de résistance à la pression extérieure du  $\text{CO}_2$  qui a fait l'objet d'essais très complets. Il permet d'augmenter dans de grandes proportions la puissance extraite d'un canal de longueur donnée, - 1 kW par cm dans EDF 3 contre 0,5 kW par cm avec des barreaux pleins - en jouant à la fois sur la puissance spécifique et sur la masse d'uranium par canal.

7° - On notera également que dès EDF 1 toutes les piles sont à canaux verticaux, disposition qui simplifie l'implantation du réacteur et des échangeurs de chaleur.

8° - Le principe du renouvellement du combustible en marche est adopté à partir d'EDF 2. L'orientation vers des centrales de puissance unitaire de plus en plus élevée conduit en effet à prévoir le renouvellement de plusieurs canaux par jour - le temps moyen de séjour en pile d'un canal est de 1000 jours - et la durée de vie neutronique du combustible peut être considérablement augmentée par une répartition judicieuse des canaux renouvelés.

9° - La construction d'EDF 3 fut décidée alors que le fonctionnement de G 2 confirmait tout l'intérêt des caissons en béton précontraint. Cette technique, qui permet de réaliser des caissons de dimensions très supérieures à celles des caissons en acier pour une même pression de  $CO^2$  (25 bars), fut adoptée pour EDF 3, mais en conservant l'implantation générale d'EDF 2.

10° - L'emploi du béton précontraint donne à l'architecte une très grande liberté dans la conception du caisson, et il devient concevable de loger à l'intérieur même de cette enceinte l'ensemble du circuit primaire. Cette solution, adoptée pour EDF 4, présente deux avantages majeurs :

- elle augmente considérablement la compacité de l'ensemble de l'installation, ce qui doit conduire à une réduction du coût d'investissement.
- elle élimine le risque d'une rupture d'une tuyauterie du circuit primaire. L'élévation des températures de gaines pouvant résulter d'un tel accident avait conduit jusqu'alors à limiter la température maximum de gaine et la puissance spécifique.

11° - Dans la disposition adoptée pour EDF 4, les échangeurs sont disposés en-dessous du coeur, et le  $CO^2$  traverse ce dernier de haut en bas. Cette disposition générale présente l'inconvénient de nécessiter un soufflage auxiliaire important dans les fonctionnements à bas régime, mais élimine tout risque d'envol des éléments combustibles en cours de déchargement. Ceci permet de simplifier les dispositifs de manutention du combustible qui représentent une part significative du coût de la Centrale.

12° - Parallèlement à l'évolution de l'architecture même des centrales à graphite qui permettait d'augmenter les puissances unitaires, les progrès réalisés dans les domaines neutroniques (réseaux sous modérés), thermiques (gainés à chevrons) et métallurgiques (augmentation des températures limites) permettaient également une



augmentation des puissances spécifiques dans le combustible et dans le coeur. L'ensemble des progrès réalisés est bien résumé dans le tableau I, qui montre à la fois l'accroissement des puissances unitaires et des performances spécifiques.

13° - L'élément combustible adopté pour EDF 3, et conservé pour EDF 4, exploite au mieux les possibilités de l'élément refroidi extérieurement. On atteint des températures nominales de 445° C sur gaine et de 590° C au coeur de l'uranium (sur quelques éléments les températures atteintes peuvent être proches de 500° C et 650° C). D'autre part, la présence de molybdène allié à l'uranium permet au tube (23 x 43 mm) de résister à la pression extérieure élevée.

14° - L'emploi de caissons en béton précontraint, et l'intégration du circuit primaire ouvrent maintenant la voie à une amélioration des performances. Il semble en effet possible d'augmenter la pression du CO<sub>2</sub> au moins jusqu'à 40 bars sans compliquer sérieusement la structure du caisson. Une telle augmentation s'accompagnerait d'une amélioration des échanges de chaleur. D'autre part, on a vu que la sécurité de fonctionnement accrue apportée par l'intégration du circuit primaire permet d'augmenter les puissances spécifiques.

15° - Ce potentiel devient utilisable dès lors que l'on adopte un combustible gainé et refroidi intérieurement et extérieurement (élément "annulaire") puisque simultanément on améliore le refroidissement de l'élément et on égalise les pressions sur ses deux faces. Les premiers essais neutroniques ayant montré qu'il était possible de réaliser des éléments combustibles de grandes dimensions tout en conservant l'uranium naturel, il a été décidé d'étudier un projet utilisant l'élément combustible annulaire.

### L'élément combustible annulaire [3]

16° - Les matériaux utilisés pour l'élément annulaire sont pratiquement les mêmes que pour l'élément tubulaire, avec toutefois une simplification : le molybdène peut être abandonné puisque le tube n'a plus à résister à la pression extérieure. Tous les essais fondamentaux effectués pour les éléments combustibles des premières piles sont donc utilisables pour ce nouvel élément, ainsi qu'une partie importante des essais en pile.

17° - On a ainsi conservé pour la gaine externe, à chevrons, une température limite nominale de 445° C, comme dans EDF 3 et EDF 4. La gaine interne, dont nous verrons par la suite qu'elle subit des efforts plus faibles, peut supporter sans déformation une température plus élevée qui a été prise égale à 480° C. Dans les conditions du projet de référence dont les caractéristiques sont données à la fin de ce rapport, la température d'uranium ne dépasse pas 550° C.

18° - On s'est imposé de choisir un élément combustible dont les performances soient proches de l'optimum économique mais qui ne présente cependant pas de risques trop grands dans l'immédiat, tant du point de vue fabrication que des points de vue neutronique et thermique. Les études économiques ont d'ailleurs montré que le choix de l'élément serait pratiquement le même pour des centrales de puissance supérieure à 1000 MWe. L'élément retenu a pour diamètre interne et externe 77 x 95 mm (figure 1).

19° - Ceci représente une très grande augmentation de section droite par rapport à l'élément tubulaire (25 cm<sup>2</sup> au lieu de 10 cm<sup>2</sup>). Il est ainsi possible de réduire considérablement le nombre de canaux et d'augmenter le pas du réseau. Nous reviendrons par la suite sur les simplifications que cela apporte du point de vue des appareils de chargement. D'autre part, le coût de fabrication d'un élément combustible dans une technique donnée, dépend peu du poids de l'élément. Plus l'élément est gros, plus le coût au kilogramme d'uranium gagné est bas. Par contre, l'augmentation de la section droite coûte en réactivité, et conduit, pour une puissance spécifique donnée, à une élévation de la température maximum d'uranium.

20° - L'augmentation du diamètre intérieur par rapport à l'élément EDF 3 est également très sensible. Le grand diamètre retenu présente deux avantages métallurgiques :

- la stabilité de la gaine interne au cours de cyclages thermiques (et en particulier au cours d'une baisse de température) est meilleure car elle est proportionnelle au produit de la pression du CO<sub>2</sub> par le diamètre de la gaine.
- la fabrication de l'élément combustible (usinage et gainage interne) est d'autant plus facile que ce diamètre est grand.

21° - D'autre part, la puissance extraite de l'élément dépend au premier chef de la section de passage de gaz interne, et donc du

diamètre interne de l'élément comme le montre la figure 2. Par contre, l'augmentation du diamètre interne est très défavorable du point de vue neutronique (figure 3).

22° - Le choix indiqué au paragraphe 18 résulte d'un compromis entre ces diverses considérations. Il est intéressant de noter que l'élément combustible choisi pourra être essayé en vraie grandeur dans des canaux spécialement aménagés à cet effet dans EDF 3, alors que les premiers essais en pile d'éléments annulaires de dimensions réduites se feront dès EDF 2.

#### Propriétés thermiques de l'élément annulaire [4]

23° - Les écoulements interne et externe de l'élément annulaire jouent un rôle assez sensiblement différents dans l'évacuation de la chaleur produite, du fait de leur caractère dissymétrique : la section de passage de gaz interne est limitée alors que l'on peut adapter librement la section de passage de gaz externe.

24° - Le rôle principal de l'écoulement externe est d'évacuer le maximum de puissance. On utilise pour cela les meilleures gaines à chevrons extrapolées à partir des gaines de l'élément EDF 3. Une extrapolation simple consiste à augmenter le nombre de secteurs proportionnellement au diamètre externe de l'élément en conservant la hauteur, l'épaisseur, l'espacement et le pas des ailettes. Partant d'une gaine EDF 3 comportant 8 secteurs, on aboutit ainsi à une gaine comportant 16 ou 24 secteurs (figure 1). L'expérience a confirmé que l'on conservait ainsi les excellentes propriétés des gaines à chevrons. L'augmentation de la surface d'échange, jointe à l'augmentation de pression (40 bars au lieu de 25), permet de multiplier par 3,5 la chaleur extraite par la surface externe.

25° - L'écoulement interne permet de maintenir la température de la gaine interne à une température compatible avec le matériau utilisé. La température d'uranium reste alors à un niveau acceptable. Les études détaillées ont montré qu'il fallait réaliser un compromis entre la nécessité de faire passer un débit aussi grand que possible à l'intérieur du tube et le souci que ce gaz ne sorte pas trop froid. Les études détaillées ont conduit à choisir une gaine peu frottante, mais ayant un coefficient d'échange de chaleur suffisamment élevé, permettant de faire passer un débit assez grand à l'intérieur du tube tout en conservant une température de sortie du gaz acceptable.

On a le choix pour cela entre une gaine à ailettes longitudinales et une gaine corruguée, qui, toutes les deux, permettent d'évacuer environ un tiers de la puissance vers l'intérieur. Les essais qui se poursuivent permettront de choisir entre ces deux types de gaine.

26° - Les essais ont montré que les interactions entre les écoulements interne et externe dues essentiellement aux différences de pression dynamique, de même que la mise en régime des deux écoulements ne poseraient pas de problèmes.

#### Propriétés neutroniques de la pile

27° - On a indiqué aux paragraphes 16 et 17 que le choix de l'élément combustible était imposé pratiquement par des considérations neutroniques qui conduisent à limiter à la fois la section droite de l'élément et son périmètre extérieur. Les méthodes usuelles de calcul des réseaux à graphite dérivent de corrélations effectuées à partir de mesures globales de laplaciens dans des réseaux classiques : section droite d'uranium comprise entre 5 et 15 cm<sup>2</sup>, pas compris entre 15 et 25 cm. Les expériences effectuées dans l'empilement critique MARIUS [ 5 ] ont montré que ces méthodes de calcul devaient être corrigées lorsque la section droite d'uranium et le pas dépassaient nettement ces valeurs.

28° - Il devient nécessaire en particulier de corriger l'intégrale effective de résonance de l'uranium 238 pour tenir compte de la distribution non uniforme des neutrons en cours de ralentissement dans le modérateur, ce qui conduit à majorer la capture résonnante aux énergies élevées et à la diminuer aux énergies basses. Dans le même ordre d'idées, on comprendra aisément que le graphite des cellules ne contenant pas d'uranium contribue peu au ralentissement des neutrons tout en absorbant des neutrons thermiques. Les singularités du réseau, telles que les emplacements de barres de contrôle, ont donc un rôle défavorable. La technique de l'aplatissement par gavage, utilisée dans les piles EDF 1 à EDF 4, et qui consiste à faire varier radialement le rapport de modération grâce à un chargement partiel de la zone périphérique, perd également une partie de son intérêt.

29° - Le choix d'un élément de 25 cm<sup>2</sup> de section droite est guidé par l'ensemble de ces considérations. Les valeurs élevées de  $k_{\infty}$  obtenues en l'absence de molybdène permettraient de choisir un

élément plus gros, mais il ne serait pas possible d'augmenter proportionnellement le trou intérieur (fig. 2) et les surfaces d'échange. Le gain global serait faible. En se limitant à une telle section droite, on évite enfin de rencontrer des problèmes trop sérieux de singularités du réseau.

30° - Le cycle de combustible de ce type de pile est très comparable à celui des piles précédentes [5]. L'évolution de la réactivité est commandée essentiellement par le facteur de conversion initial et par la température du modérateur dont dépendent les sections efficaces effectives de fission et de capture du  $^{239}\text{Pu}$ . Le premier est légèrement supérieur à celui d'EDF 3, l'absorption dans le molybdène étant remplacée essentiellement par l'absorption supplémentaire dans  $^{238}\text{U}$ . La seconde est pratiquement la même que dans EDF 3.

31° - Il en résulte une augmentation très rapide de la réactivité au début du fonctionnement, pouvant atteindre environ 3 % au bout de 100 à 200 jours. En régime d'équilibre, on dispose d'une réserve de réactivité qui dépend de l'irradiation de rejet du combustible : 2 % pour une irradiation moyenne de rejet de 3500 MWj/T, 1 % pour 5000 MWj/T.

32° - Le coefficient de température du modérateur varie lui aussi comme celui des piles précédentes. Les valeurs élevées de ce coefficient nécessitent de prévoir un pilotage spatial permettant d'éviter les basculements du flux dans la pile. La capacité calorifique élevée du modérateur, qui se traduit par une constante de temps voisine de 15 minutes, rend toutefois ce pilotage relativement aisé.

33° - Les variations importantes de réactivité au cours de la vie de la pile, et au cours de régimes transitoires (baisse de puissance, refroidissement, démarrage) conduisent à prévoir une très grande souplesse d'utilisation des barres de contrôle. D'autre part, l'accroissement de sécurité due à l'intégration du circuit primaire permet de réduire le nombre de barres de sécurité. On est donc conduit à utiliser un nombre élevé de barres grises qui servent à la fois au contrôle des régimes transitoires et à l'aplatissement radial du flux.

## L'empilement de graphite

34° - On a conservé pour le projet de référence le pas triangulaire qui est adopté depuis l'empilement d'EDF 2 utilisant des briques de graphite hexagonales. Le pas de ce réseau est évidemment beaucoup plus grand (34,5 cm) étant donné la section droite élevée du combustible.

35° - Deux types d'empilement sont en cours d'étude [6]. Le premier utilise des briques hexagonales de grandes dimensions reliées entre elles par des clavettes, les canaux étant forés suivant leur axe. C'est une extrapolation directe de l'empilement EDF 2. Le second, l'empilement lacunaire, est représenté sur la figure 4. On constate que ce type d'empilement permet de disposer de canaux de dimensions pratiquement quelconques sans être gêné par l'épaisseur minimum de graphite entre le canal et le fond des gorges des clavettes. Par contre, les contraintes dues aux déformations différentielles Wigner dans les briques situées autour d'un canal vide sont plus élevées. Des considérations de simplicité de fabrication et d'usinage des briques, et de montage de l'empilement - seront à prendre en compte pour choisir entre les deux types d'empilement.

36° - Un problème important relatif à la tenue de l'empilement de graphite est celui de la réaction  $\text{CO}_2$ -graphite. Il s'agit dans le cas présent d'une réaction purement radiolytique, l'empilement étant tout entier à une température inférieure au seuil de la réaction thermique. Le taux de réaction est proportionnel au nombre de molécule de  $\text{CO}_2$  par unité de volume de modérateur donc à la pression du  $\text{CO}_2$ , et à l'énergie  $\gamma$  absorbée dans le modérateur. Cette dernière dépend de la puissance volumique dans le coeur et de la proportion de  $\gamma$  absorbée dans le combustible (plus de 60 % de tous les  $\gamma$  produits, dans le cas de l'élément combustible de référence). Il en résulterait cependant une perte moyenne de graphite dans le coeur supérieure à 2 % par an si des moyens appropriés n'étaient pas mis en oeuvre pour inhiber cette réaction.

## Dispositifs de manutention

37° - La réduction du nombre de canaux résultant de l'utilisation de barreaux annulaires (gain d'un facteur 3 environ) et la disposition des barres de contrôle, conduisent à adopter pour l'ensemble de <sup>36</sup>chargement-déchargement, un nombre de canaux par cellule

sensiblement plus faible qu'à EDF 3 et EDF 4 (cellules comportant 7 à 19 canaux contre 33 canaux). Cependant pour simplifier au maximum l'ensemble mécanique de manutention des éléments combustibles, d'autres dispositifs opérant sur chaque canal sont actuellement étudiés, placés soit à l'extérieur, soit à l'intérieur même du caisson.

38° - Un premier dispositif pouvant desservir plusieurs canaux utilise un déviateur. Le déviateur est un bras à parallélogramme qui ne peut desservir une fois déplié qu'un seul canal de la cellule de chargement. Il peut cependant desservir tous les canaux situés sur un même rayon autour du puits de chargement, si, en rotation, on peut lui donner par un système approprié, l'orientation désirée (6 positions à 60°). Dans le cas d'une cellule à 7 canaux, il faut donc un déviateur et éventuellement un simple tube pour le canal central de la cellule. Il est à noter que le grappin est solidaire du déviateur ce qui oblige pour chaque manutention d'éléments combustibles à remonter le déviateur dans la machine (figures 5 et 6).

39° - Dans le cas de cellules à 7 canaux, on peut aussi envisager de prolonger les canaux de la cellule par des guides d'éléments combustibles venant aboutir au puits de chargement central. Le guidage du grappin dans ce dispositif en forme de pieuvre est effectué par une "cuillère" qui peut être orientée sur l'un des six canaux périphériques. Comme précédemment, le déchargement du canal central peut se faire par un tube-guide (figures 5 et 6).

40° - Il est possible aussi d'envisager un déchargement individuel des canaux externe au caisson. Le dispositif de manutention du combustible est de ce fait simplifié puisque seul un guidage vertical de l'élément combustible dans l'enceinte sous pression est nécessaire. Dans le cas des réacteurs du type EDF 3 et EDF 4 le nombre de canaux, la faible différence entre le pas du réseau et le diamètre de la chemise de l'élément combustible ne permettraient pas d'envisager une telle solution. Actuellement bien que le nombre de canaux reste important, une étude est lancée sur la possibilité de construire une dalle supérieure comportant environ un millier de pénétrations, et sur les réactions de ce type de dalle sur l'ensemble du projet de caisson.

41° - La précontrainte de la dalle serait faite autour de cette dernière afin de disposer au maximum de l'espace disponible entre les puits. Les principaux problèmes soulevés à l'occasion de cette étude, concernent :

- le refroidissement des puits en fonctionnement normal et en chargement-déchargement,
- la disposition de ce circuit dans la dalle,
- le calorifugeage de la face intérieure,
- la mise en place du béton.

42° - Le système de déchargement interne au caisson (figure 7) présente l'avantage d'inclure dans le caisson toute la manutention du combustible. La machine qui n'a pas de protection individuelle est placée dans un grenier séparé du réacteur par une dalle percée d'autant de trous qu'il y a de canaux. Il en résulte que la machine est légère et simple<sup>1)</sup>.

43° - La dalle de séparation doit remplir le double rôle d'écran thermique et biologique, d'une part pour assurer de bonnes conditions de fonctionnement à la machine de chargement, d'autre part pour permettre l'accès dans le grenier après arrêt du réacteur, une fois évacués les éléments combustibles sortis de la pile.

44° - Il est prévu deux sas de dimensions suffisantes, d'une part pour sortir les paniers d'éléments combustibles, d'autre part pour évacuer une machine de chargement ou introduire un robot de dépannage. On s'est ainsi assuré le maximum de possibilités d'entretien des machines. Par contre, il est évident que ces sas doivent présenter une sécurité absolue.

45° - Des systèmes de barres de contrôle à chaîne pouvant aisément être stockées dans la dalle et évacuées par la machine de chargement, sont en cours d'études.

#### Dispositions générales

46° - La disposition actuellement retenue reste celle d'EDF 4 dont on peut voir une coupe sur la figure 8. Elle se caractérise par les grandes lignes suivantes :

---

<sup>1)</sup> Une maquette à échelle 1 de la machine et d'une partie du grenier a été exécutée au Centre de Saclay dans le cadre d'un contrat Euratom, et fonctionne depuis Avril 1963.



- Coeur situé au-dessus des échangeurs,
- Aire-support s'appuyant sur une jupe reposant elle-même sur le fond du caisson en béton précontraint,
- Circulation descendante du gaz dans le coeur.

47° - L'autre disposition pouvant être envisagée est celle comprenant les échangeurs autour du réacteur, qui permet un supportage de l'empilement plus simple, mais complique les problèmes de refroidissement du caisson (partie inférieure du caisson à la température de sortie du fluide de refroidissement). De plus, l'implantation des soufflantes doit se faire à la partie supérieure du caisson afin de les maintenir au point froid du circuit de refroidissement.

48° - La disposition superposée présente, par contre, les principaux avantages suivants :

- seul le gaz "froid" reste en contact avec le calorifuge, d'où simplification des problèmes posés sous pression par l'isolement thermique du caisson,
- l'extrapolation à une centrale de 1000 MW électriques semble plus aisée, le diamètre de la dalle supérieure étant sensiblement plus faible,
- l'augmentation de pression est pour les mêmes raisons plus facilement envisageable,
- dans le cas où le sens de circulation du gaz de refroidissement doit se faire dans le sens descendant dans le coeur du réacteur (pour éviter l'envol des éléments combustibles), la structure des échangeurs reste plus simple (le fonctionnement des échangeurs devrait être inversé dans le cas de la disposition annulaire).

49° - Dans chacune des dispositions envisageables, il est nécessaire d'avoir accès aux échangeurs périodiquement pour des opérations d'entretien jugées nécessaires (par exemple tube d'échangeur défaillant qu'il faut reboucher après détection de fuite). Cette exigence impose d'avoir une protection efficace entre le coeur du réacteur et les échangeurs : couronne disposée autour du coeur dans le cas de la disposition annulaire, protection située au-dessous de la face inférieure du coeur, dans le cas de la disposition superposée.

50° - Cette zone qui doit assurer un rôle de protection biologique tout en laissant passage aux gaz chauds descendant du coeur vers les échangeurs et aux gaz froids remontant vers le coeur a été dénommée zone intermédiaire. Plusieurs solutions ont été étudiées qui peuvent se répartir en deux groupes :

- protection complétée par une corniche annulaire permettant en même temps le supportage du coeur.
- protection traversée par le gaz descendant sans corniche annulaire.

51° - Les calculs de protection effectués ont permis, complétés par une série d'essais, de s'orienter vers la deuxième solution qui offrait <sup>l'avantage</sup> de la simplicité (peau d'étanchéité, bétonnage, mise en place des échangeurs).

52° - L'aire-support repose, comme nous l'avons vu précédemment, sur une jupe cylindrique ; cette jupe assurant en même temps la séparation des gaz chauds et des gaz froids, doit être calorifugée pour limiter les contraintes dues aux gradients thermiques locaux.

53° - Les échangeurs envisagés pour ce type de centrale restent, comme pour EDF 4, à circulation forcée. Plusieurs solutions sont actuellement étudiées pour tenir compte des exigences imposées par ailleurs (perte de charge, hauteur, diamètre, facilités de mise en place dans le caisson, planning). Le cycle le plus simple à une pression semble être préférable. Les cycles à deux pressions ou à resurchauffe rendent plus délicats les problèmes de régulation en augmentant sensiblement le nombre de pénétrations dans le caisson.

54° - La puissance de soufflage étant d'environ 4 % de la puissance thermique du réacteur, on est conduit à choisir quatre soufflantes de 18 à 20 MW unitaires entraînées par turbine. Ce nombre est un compromis entre les possibilités de réalisation et les impératifs de sécurité.

55° - La disposition intégrée impose pour les soufflantes des conditions particulières : d'une part géométriques, d'autre part de fonctionnement (difficultés de mettre un by-pass, problèmes de démarrage) qui conduisent à des soufflantes se rapprochant des soufflantes type centrifuge.

## Conclusion

56° - L'examen des caractéristiques du projet de référence (Tableau II) comparées à celles des premières piles de la filière (cf tableau I), fait apparaître les progrès considérables des performances obtenus en quelques années, entre autres un gain d'un facteur 3,5 sur les puissances spécifiques et une augmentation d'un facteur 10 sur la puissance d'un canal par rapport à EDF 1.

57° - L'emploi de l'élément annulaire rendu possible par les progrès effectués au cours des dernières années dans les domaines neutronique, thermique et métallurgique, apparaît ainsi comme un tournant dans le développement de la filière gaz-graphite et uranium naturel.

58° - Les perspectives d'avenir de ces piles sont également intéressantes, en particulier sur deux points essentiels :

- l'amélioration probable des propriétés des gaines internes, qui font l'objet d'un important programme d'essais, devrait se traduire par des performances intrinsèques meilleures telles que, rendement du cycle thermodynamique, puissance spécifique, nombre de canaux, etc...

- l'augmentation de la puissance unitaire des installations peut être envisagée.

59° - Compte tenu du gain que l'on attend sur le facteur d'aplatissement, il serait possible d'obtenir une puissance voisine de 1000 MWe en conservant les dimensions du caisson d'EDF 4.

## REFERENCES

- 1 R. BOUSSARD, F. CONTE ( C.E.A.)  
J. STOLZ, H. MILLOT (E.D.F.)  
Expérience de fonctionnement des réacteurs G 2 - G 3 et d'EDF 1
  
- 2 C. BIENVENU, G. LAMIRAL (E.D.F.)  
Les centrales nucléaires EDF 2 - EDF 3 - EDF 4
  
- 3 M. SALESSE, J.A. STOHR, G. JEANPIERRE (C.E.A.)  
Développements récents des éléments combustibles français de  
la filière à uranium naturel-graphite-CO<sub>2</sub>
  
- 4 P. GELIN (C.E.A.)  
J.P. MILLIAT (E.D.F.)  
Etudes aérodynamiques et thermiques de gaines d'éléments com-  
bustibles refroidis au gaz
  
- 5 P. BACHER, F. COGNÉ (C.E.A.)  
B. NOC (E.D.F.)  
Physique des piles à graphite
  
- 6 R. MARTIN, R. ROCHE (C.E.A.)  
P. BRIGNON (E.D.F.)  
Etude de structures nouvelles adaptées aux réacteurs graphite-  
gaz et eau lourde-gaz.

TABLEAU I

	G 2	EDF 1	EDF 2	EDF 3 & EDF 4
Puissance électrique nette (MWe)	35	70	200	480
Puissance spécifique (MWe/Tu)	0,3	0,5	0,8	1,1
Puissance volumique (MWe/m <sup>3</sup> -coeur.)	0,09	0,145	0,235	0,345
Puissance électrique moyenne par canal (kWe)	30	60	100	165

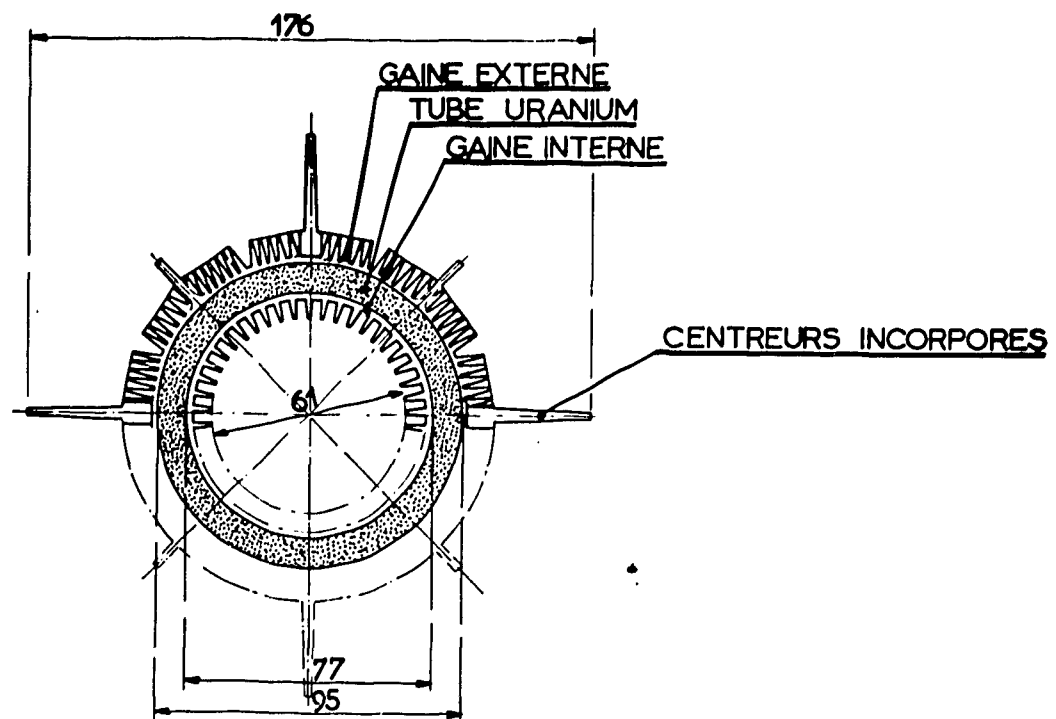
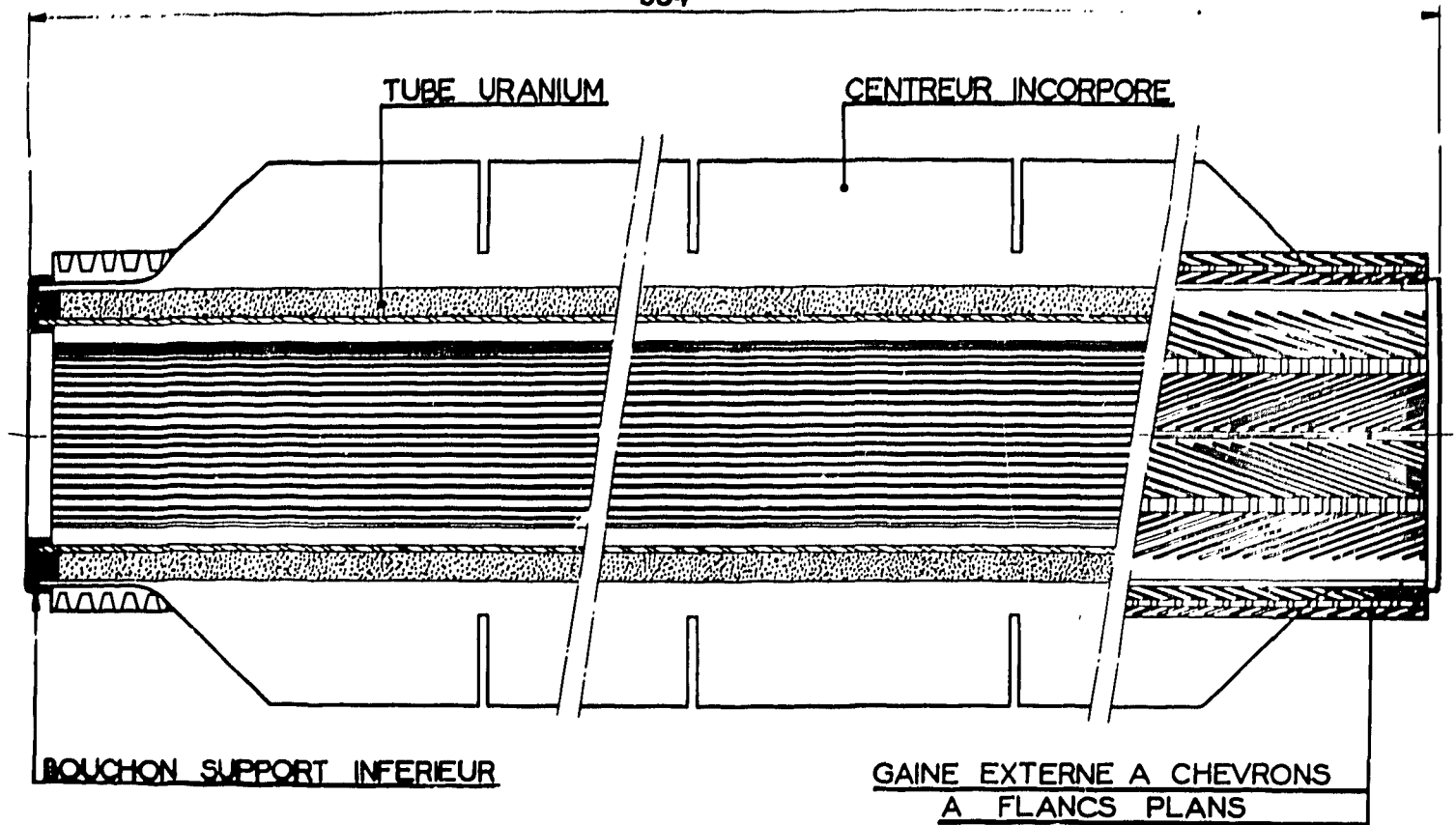
TABLEAU II

Caractéristiques du projet de référence

Puissance électrique nette (MWe)	480	Diamètre interne de l'élément (mm)	77
Puissance thermique (MW)	1710	Diamètre externe de l'élément (mm)	95
Puissance spécifique max. (MWe/Tu)	3,2	Longueur totale de l'élément (mm)	600
Puissance spécifique moy. (MWe/Tu)	1,65	Diamètre interne de la chemise (mm)	176,5
Puissance volumique moy. (MWe/m <sup>3</sup> de coeur)	0,53	Température nominale de gaine interne (° C)	480
Puissance moyenne par canal (kWe)	615	Température nominale de gaine externe (° C)	445
Diamètre du coeur (m)	11,30	Température de sortie du gaz (° C)	384
Hauteur du coeur (m)	9	Température d'entrée du gaz (° C)	220
Nombre de canaux chargés	780	Perte de charge canal (bar)	1,68
Nombre total de canaux	979	Pression du gaz (bar)	40
Pas triangulaire (cm)	34,5		

# PROJET I.N.C.A

564



## PLAN DE L'ÉLÉMENT ANNULAIRE

GAINÉ EXTERNE A AILETTES EN CHEVRONS  
A FLANCS PLANS ET CENTREUR INCORPORES

GAINÉ INTERNE A AILETTES LONGITUDINALES

TUBE D'URANIUM 77,95 EN ALLIAGE TRAITÉ EN PHASE  $\beta$

Figure: 2

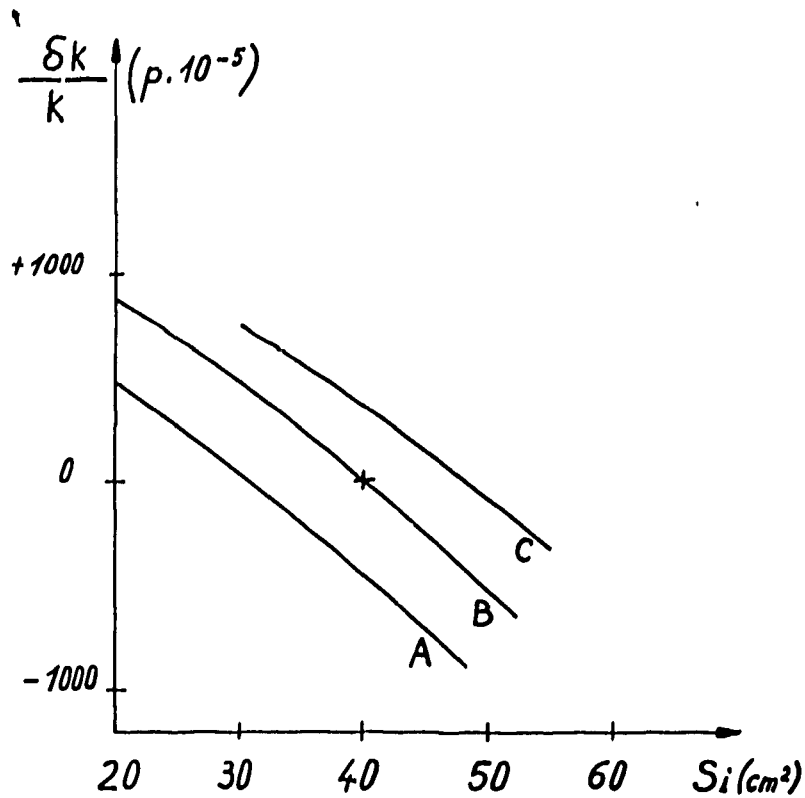
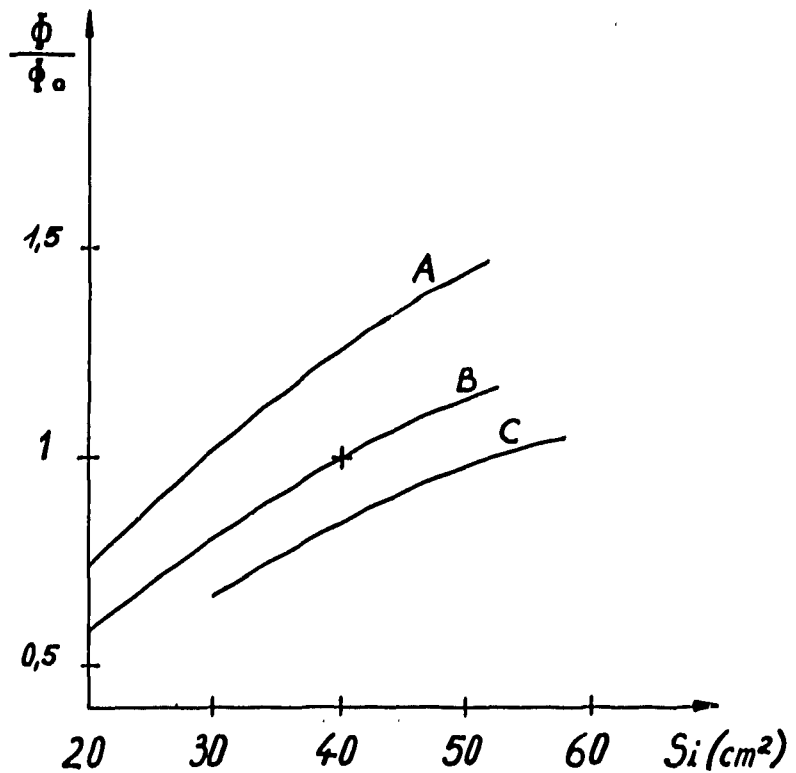


Figure: 3



Figures 2 et 3. Réactivité et puissance spécifique en fonction de l'élément combustible

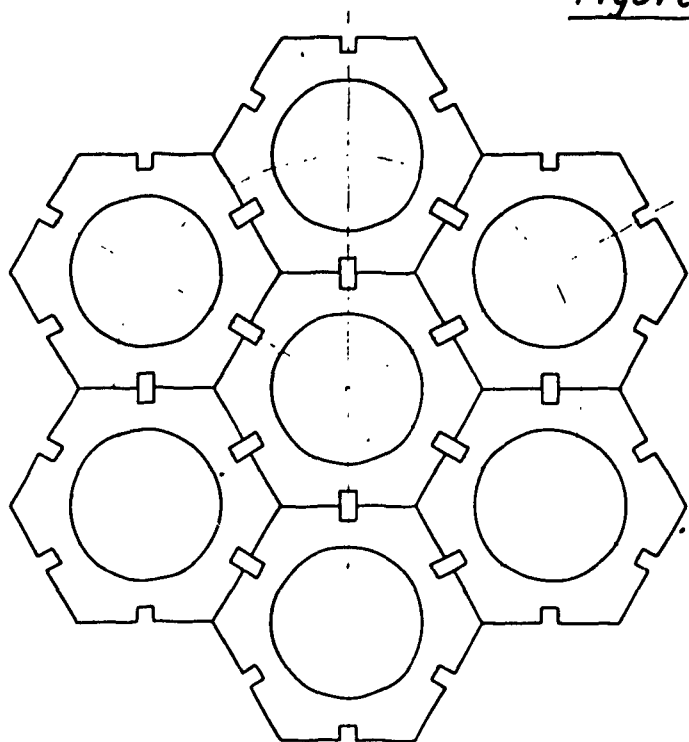
A:  $S_u = 20 cm^2$

B:  $S_u = 25 cm^2$

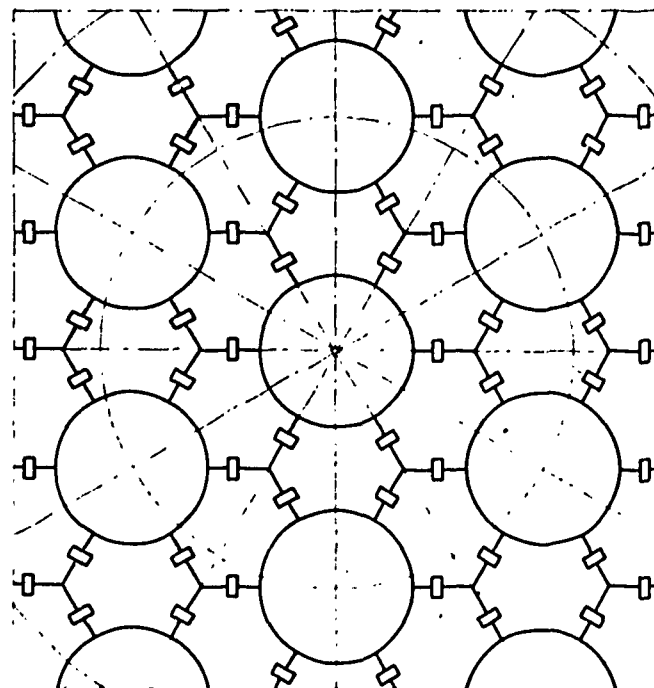
C:  $S_u = 30 cm^2$

+ Élément 77x95 mm

Figure: 4



A: Emplacement classique

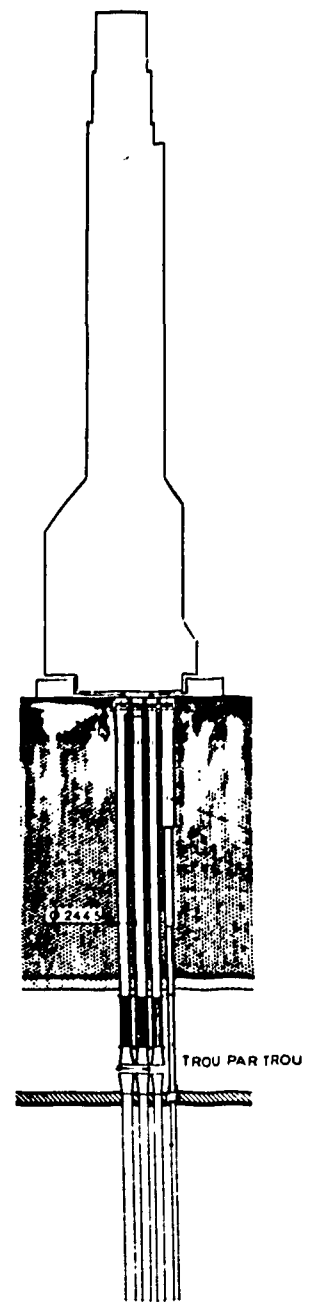
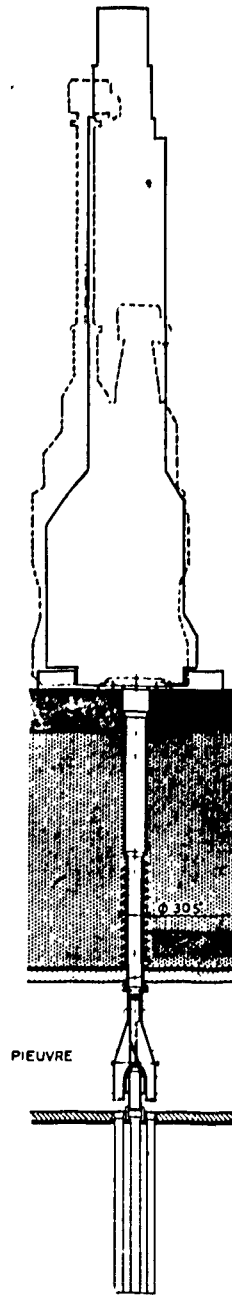
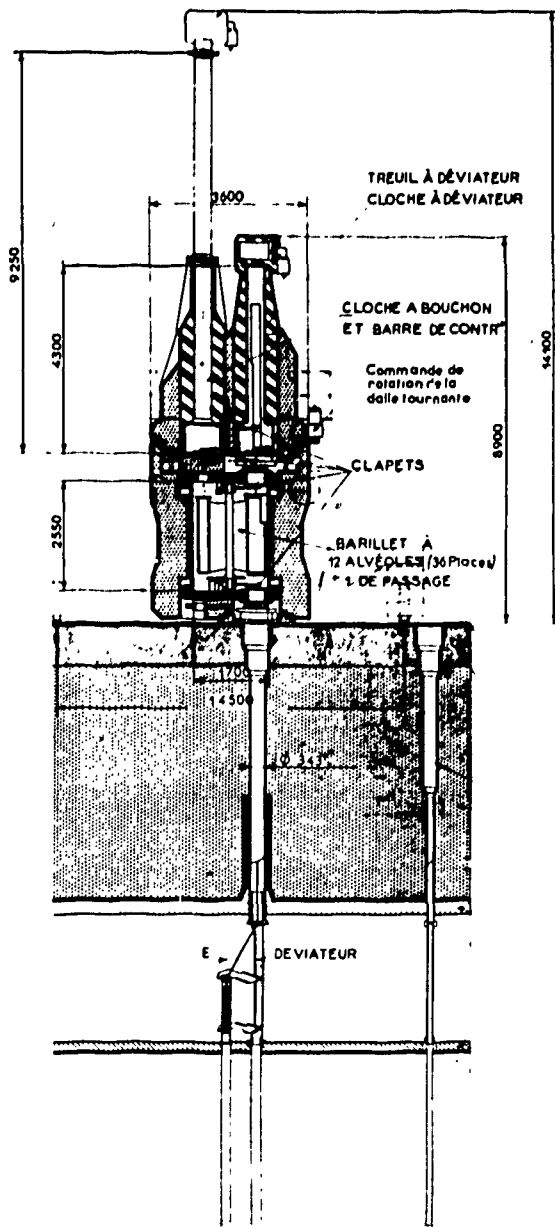


B: Emplacement lacunaire

# DISPOSITIF PRINCIPAL DE MANUTENTION EXTERNE AU CAISSON

Figure 5

TREUIL À BOUCHON ET BARRE DE CONTRÔLE





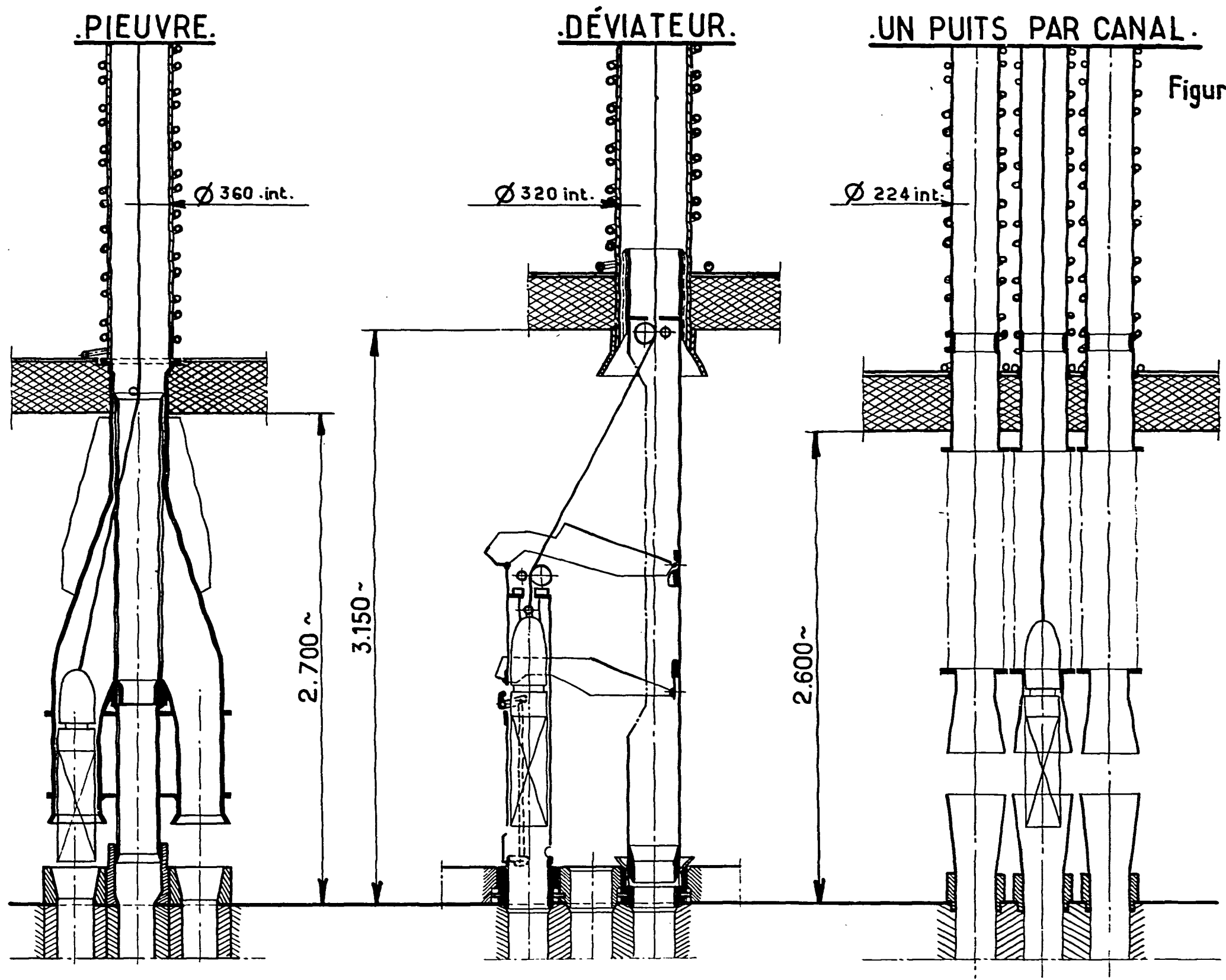
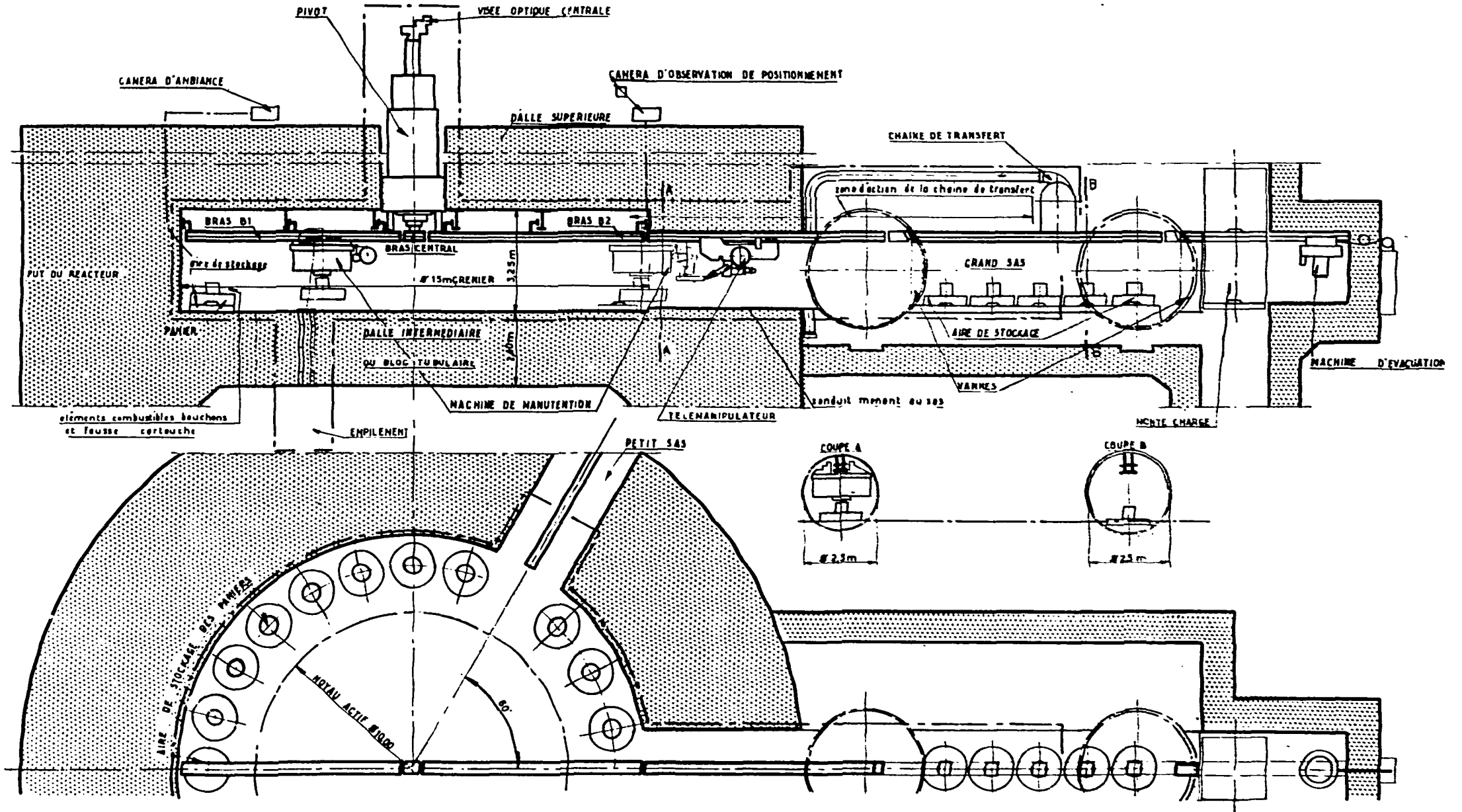


Figure: 6

# DISPOSITIF PRINCIPAL DE MANUTENTION INTERNE AU CAISSON

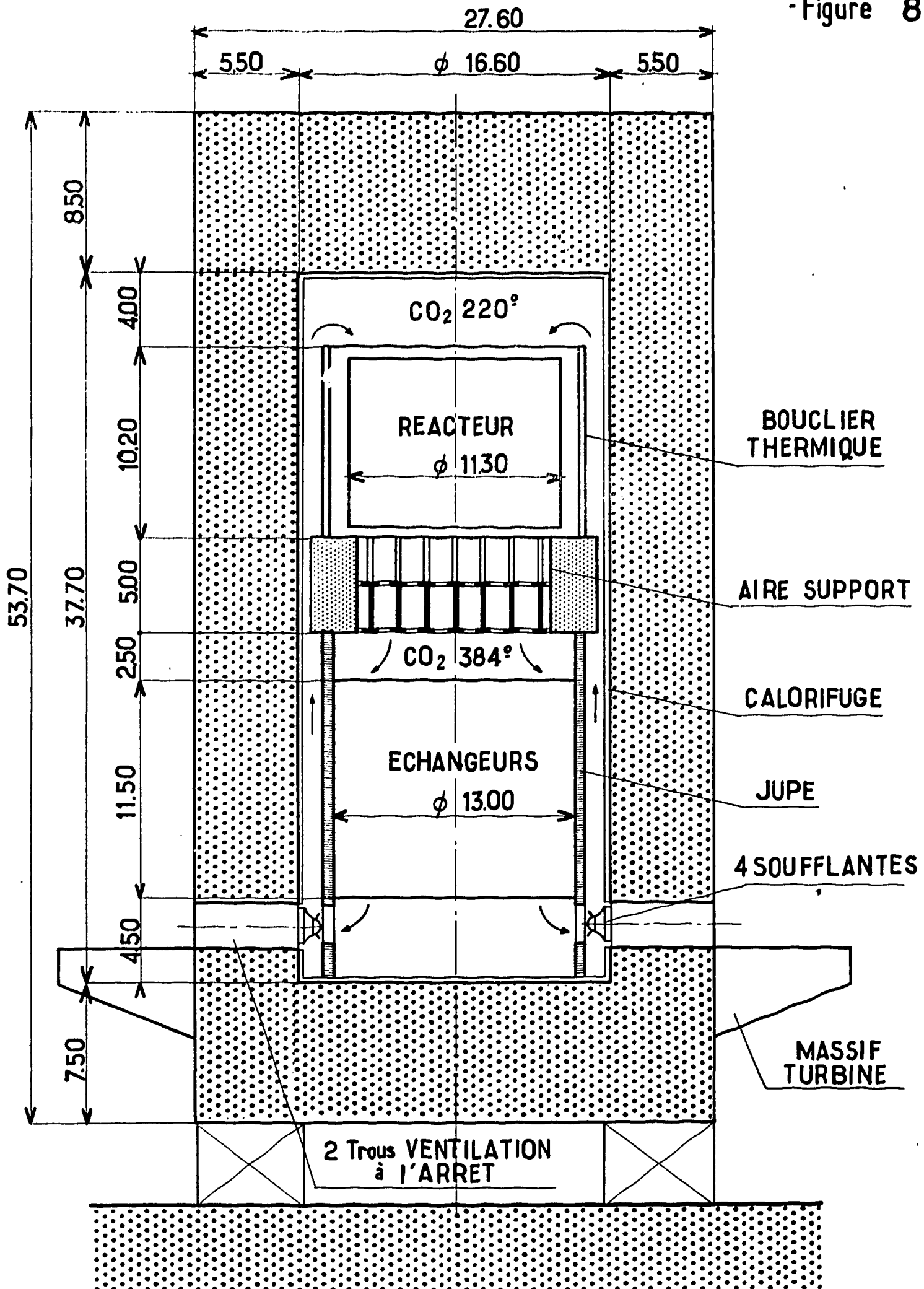
Figure 7

-21-



# PROJET "ELEMENT ANNULAIRE" - 40 Bars -

- Figure 8



**FIN**