PREMIER MINISTRE
COMMISSARIAT A
L'ÉNERGIE ATOMIQUE

CEA - R 2673

DEVELOPPEMENTS RECENTS DES ELEMENTS COMBUSTIBLES FRANCAIS DE LA FILIERE URANIUM NATUREL - GRAPHITE - CO_2

par

Marc SALESSE, Jacques-A. STOHR, Guy JEANPIERRE

Rapport CEA - R 2673

Genève 1964, A Conf. 28/P/60

CENTRE D'ÉTUDES
NUCLÉAIRES DE SACLAY

CEA-R 2673 - SALESSE Marc, STOHR Jacques-André, JEANPIERRE Guy,

DEVELOPPEMENTS RECENTS DES ELEMENTS COMBUSTIBLES FRANCAIS DE LA FILIERE URANIUM NATUREL - GRAPHITE - CO_2

Sommaire.

La politique choisie en France pour le développement des éléments combustibles destinés aux réacteurs de l'Electricité de France, consiste à chercher, pour chaque pile nouvelle, à bénéficier au maximum des progrès techniques les plus récents en étudiant chaque fois un nouvel élément combustible permettant une puissance par canal aussi élevée que possible.

Les derniers éléments combustibles ainsi étudiés par le Commissariat à l'Energie Atomique sont de deux types différents :

- un élément à tube d'uranium fermé aux deux extrémités et refroidi extérieurement.

  Ce type d'élément, retenu pour les réacteurs EDF 2, EDF 3 et EDF 4 permet des puissances spécifiques maximum de l'ordre de 6 MW/t.

- un élément à tube d'uranium ouvert, refroidi intérieurement et extérieurement. /.

CEA-R 2673 - SALESSE Marc, STOHR Jacques-André, JEANPIERRE Guy,

RECENT DEVELOPMENTS CONCERNING FRENCH FUEL ELEMENTS USED IN NATURAL URANIUM - GRAPHITE - CO_2 REACTOR SYSTEMS

Summary. -

The policy followed in France for the development of fuel elements for reactors belonging to the Electricité de France has been to benefit as much as possible, for each new pile from the most recent technical progress by developing in each case a fuel element allowing the maximum power per channel.

The two latest fuel elements thus studied by the French Atomic Energy Commission are of two different types :

- a tubular uranium element closed at both ends and cooled externally.

  This type of element, chosen for the reactors EDF 2, EDF 3 and EDF 4 makes it possible to attain maximum specific powers of the order of 6 MW/metric ton.

An open tubular uranium element cooled both internally and externally, called an "annular element" which in being studied as a possibility for EDF 5. . /.

appelé "élément annulaire" et dont on étudie la possibilité pour EDF 5. Un tel élément peut permettre des puissances spécifiques supérieures à 12 MW/t.

Ces deux types d'éléments possèdent des caractéristiques communes : la gaine, pour le refroidissement externe, comporte des ailettes en chevron. Ce type de profil, qui a reçu récemment des améliorations notables augmentant son efficacité thermique, a l'avantage important d'éviter les vibrations de cartouche mais a posé des problèmes technologiques de tenue au cyclage thermique qui ont nécessité une étude approfondie.

les cartouches sont placées à l'intérieur de chemise en graphite, ce qui limite les efforts verticaux auxquels elles sont soumises et les protège lors des opérations de chargement et de déchargement.

Par contre ces deux types d'éléments posent des problèmes très différents en ce qui concerne les points suivants :

les qualités demandées aux tubes d'uranium - outre bien entendu dans les deux cas une bonne stabilité dimensionnelle sous irradiation - sont dans le cas des ./.

Such an element makes it possible to attain specific powers of over 12 MW/metric ton.

The two types of element have the following common characteristics

- the can, for external cooling, has herning-bone type fins.
  This type of profile which has been vastly improved recently thereby increasing its thermal efficiency, has the important advantage of avoiding vibration of the element, but has posed problems of resistance to thermal cycling necessitating much research.
- the fuel rods are placed inside graphite jackets, this limiting the vertical forces to which they are subjected and protecting them during charging and discharging.

On the other hand, these elements present very different problems as for as the following points are concerned :

- the characteristics required of the uranium tubes apart of course from a good dimensional stability during irradiation in the two cases are in the case of the ./.

tubes fermés une excellente résistance à la pression extérieure et dans le cas des éléments annulaires une faible absorption neutronique. On a donc dû développer. pour chacun de ces cas, une catégorie d'alliage appropriée.

le décollement possible de la gaine au cyclage thermique, qui est particulier à la gaine interne de l'élément annulaire, nécessite des études approfondies.

la chute de température au contact entre l'uranium et la gaine et la résistance de l'extrémité inférieure de la cartouche sont des questions qui présentent une difficulté accrue avec l'élément annulaire.

Au total, l'élément annulaire nécessite donc un effort important. Cet effort trouve sa justification dans le "saut" en avant qu'il peut permettre de faire aux réacteurs EDF grâce à sa forte puissance spécifique et à son poids d'uranium élevé par cartouche.

1964 - Commissariat à l'Energie Atomique - France - 16 p.

closed tubes a very high resistance to external pressure, and in the case of the annular elements a low neutron absorption. Thus for each of these two cases it has been necessary to develop a suitable type of alloy.

- a possible loosening of the can during thermal cycling, which is peculiar to the internal can of the annular element, has necessitated very much research work.
- the exact temperature drop at the contact between the uranium and the can, and the strength of the lower end of the cartridge are points which are increasingly crucial in the case of the annular element.

All in all the annular element thus calls for a great research effort. This effort is justified by the big step forward in which it will result in the case of the EDF reactors thanks to its high specific power and to the high weight of uranium in each cartridge

1964 - Commissariat à l'Energie Atomique - France 16 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.

DEVELOPPEMENTS RECENTS DES ELEMENTS COMBUSTIBLES FRANCAIS DE LA FILIERE URANIUM NATUREL - GRAPHITE - CO_2

par Marc SALESSE, Jacques-André STOHR, Guy JEANPIERRE

Commissariat à l'Energie Atomique

1. INTRODUCTION

La politique choisie en France pour le développement des éléments combustibles destinés aux réacteurs de l'Electricité de France, consiste à chercher, pour chaque pile nouvelle, à bénéficier au maximum des progrès techniques les plus récents en étudiant chaque fois un nouvel élément combustible permettant une puissance par canal aussi élevée que possible [1] .

Les derniers éléments combustibles ainsi étudiés par le Commissariat à l'Energie Atomique sont de deux types différents :

- un élément à tube d'uranium fermé aux deux extrémités et refroidi extérieurement par des ailettes à profil chevron (voir figure 1) ;

  Ce type d'élément, retenu pour les réacteurs EdF.2 - EdF.3 et EdF.4 permet des puissances par canal supérieures à 600 kW pour des pressions de CO_2 de l'ordre de 25 hpz (voir tableau 1).

- un élément à tube d'uranium ouvert, refroidi intérieurement et extérieurement, appelé "élément annulaire" (voir figures 2 et 3). Un tel élément, utilisable sous de fortes pressions, peut permettre des puissances par canal approchant 3 000 kW.

		EdF.1	EdF.2	EdF.3 et EdF.4	Elément annulaire (projet INCA)
Pression de CO_2 (hpz)		← 25 →			26,5	40
COMBUSTIBLE	- alliage	U-Mo 0,5 %	U-Mo 1 %		U faiblement allié
	- diamètres (mm)	14 x 35	18 x 40	23 x 43	77 x 95
	- section droite (cm^2)	8	10	10	25
	- puissance spécifique maxi. (MW/t)	4,4	5,8	6	11
GAINE	- type d'ailettes	longitudinales	chevron hélicoïdal	chevron flancs plans	ext. : chevron int. : longitudinal ou corrugations
	- flux thermique superficiel max. (W/cm^2)	56	82	81	ext. : 105 int. : 70
ELEMENT COMBUSTIBLE	- support individuel	pas de support	← chemise graphite →		
	- longueur totale (cm)	← 60 →			
	- nombre par.canal	15	12	15	15
Puissance totale pour un canal central (kW)		380	500	660	2 980

TABLEAU I : CARACTERISTIQUES ET PERFORMANCES DES ELEMENTS COMBUSTIBLES FRANCAIS DE LA FILIERE URANIUM NATUREL - GRAPHITE - CO_2

2. UTILISATION DE TUBES METALLIQUES EN ALLIAGE D'URANIUM

Le C.E.A. a choisi, dès le départ de la filière EdF, de mettre l'uranium sous forme de tubes métalliques, puis pour chaque nouveau réacteur, d'essayer d'en augmenter les diamètres et d'en diminuer les épaisseurs de paroi, pour en tirer une puissance par unité de longueur de canal aussi forte que possible.

2.1 Tubes fermés aux deux extrémités

On est ainsi passé des diamètres 14 x 35 mm pour EdF.1, à 18 x 40 pour EdF.2 et maintenant à 23 x 43 pour EdF.3 et EdF.4. Ceci n'a été possible que grâce au développement des alliages uranium-molybdène [2à4] seuls capables de résister à la pression de 25 hpz retenue pour ces quatre réacteurs, grâce à leur résistance mécanique et à leur résistance à l'irradiation particulièrement élevées [5]. Aux environs de 500 °C, par exemple, leur vitesse de fluage est 100 fois moins élevée que celle de l'uranium faiblement allié, traité β. Par ailleurs, leur microstructure, au-dessus de 1 % de Mo, est constituée de fines lamelles alternées de phase α et γ très favorable à la tenue sous irradiation. Enfin ce type d'alliage peut tolérer, sans trop de dommages, de courtes incursions de température au-dessus de la limite de la phase β, alors que l'uranium faiblement allié, traité β, subit instantanément une modification complète de la structure dès qu'il est porté à une température supérieure à cette limite.

Des études sont maintenant en cours pour essayer d'améliorer encore la résistance mécanique à chaud ainsi que la résistance au gonflement de ces alliages par adjonction d'un troisième composant tel que Al, Si, Sn ...

L'étude de la résistance des tubes à la pression extérieure a fait l'objet de deux types d'essais hors piles [6] : essais avec gradient thermique, le tube étant chauffé intérieurement par une chaufferette de graphite et essais isothermes dans des fours spéciaux. Les résultats obtenus montrent que l'on peut classer les tubes en deux catégories, suivant leur épaisseur de paroi : les tubes "épais", tel que le tube EdF.2 et le tube EdF.3 qui voient leurs diamètres diminuer lentement avec le temps, sans qu'il y ait jamais écrasement (voir figure 4) et les tubes "minces" qui, après une certaine période de fluage progressif, s'écrasent tout à coup très rapidement (voir figure 5).

Ces résultats sont en cours de vérification en pile, dans G.2 et G.3, où plus de 30 canaux à tubes enrichis ont été chargés, et dans EdF.1 ou 200 canaux spéciaux sont également en cours d'irradiation. D'ores et déjà on a enregistré des

résultats très encourageants [7]. Par exemple dans G.2 sous 15 hpz, des tubes 20 x 28 en U-Mo 1,5 % enrichi à 1,6 % ont atteint un taux d'irradiation de 4 960 MWj/t : on a noté une légère ovalisation et une diminution du diamètre extérieur comprise entre 1 et 2 mm au centre de la cartouche, mais pas de flèche ni de déformation de surface, ni de croissance des extrémités.

Rappelons que par ailleurs, à des températures et des pressions plus faibles, on a enregistré dans le réacteur expérimental EL.3 des taux d'irradiation élevés sur des cartouches à 0,5 % de Mo (avec et sans traitement thermique), à 1 % 1,5 %, 2 % et 3 % (bruts de coulée) : tous ces alliages ont été portés à plus de 7 000 MWj/t (et certains jusqu'à 10 500) sans déformation d'ensemble importante : seule une légère flèche ou ovalisation est remarquée sur les tubes les plus fortement irradiés, mais il n'y a pas de croissance importante sous irradiation et la surface, interne et externe, est restée lisse (sauf dans le cas de cartouches en U-Mo 0,5 % portées à 5 500 MWj/t, où il a été noté une "peau d'orange" sur la surface interne du tube).

2.2 Tubes ouverts, refroidis intérieurement et extérieurement

Les tubes fermés ont malheureusement une limite inévitable d'utilisation : celle de leur écrasement par fluage, lorsque, à épaisseur donnée, on augmente leurs diamètres et la pression du gaz caloporteur. Cette considération a amené l'EdF et le C.E.A. à lancer le projet INCA [1] dans lequel les "éléments annulaires" (voir figure 3) sont à tube d'uranium de diamètre 77 x 95 mm ouvert à ses deux extrémités et dans lequel la pression du gaz est de 40 hpz.

Les alliages uranium-molybdène ne sont plus indispensables pour de tels tubes, puisque la résistance mécanique devient un facteur secondaire. Comme ils présentent une absorbtion neutronique relativement élevée, on cherche à les remplacer par des alliages à faible teneur. Les premiers alliages essayés [8 à 10] sont du type Sicral F.1, Sicral F.2 et U-Cr. Ils sont destinés soit à la trempe directe (eau ou huile) soit à la trempe isotherme et vont être irradiés, dès le démarrage d'EdF.2, sous forme d'éléments annulaires 54 x 70 mm (voir figure 2). Par ailleurs, le C.E.A. étudie aussi des alliages dits "autotrempants", qui éviteraient les inconvénients de la trempe. Des cartouches de ces alliages sont en cours d'irradiation dans EL.3.

3. GAINES A AILETTES CHEVRON

Les performances thermiques assez remarquables de ce type de profil sont étudiées dans un autre rapport [11]. Rappelons-en ici un autre avantage, très

important [12] : la symétrie des écoulements qui confère aux éléments combustibles une grande stabilité, comme l'ont montré tous les essais faits jusqu'à présent, à froid ou à chaud et sous les débits gazeux les plus variés : aucune vibration importante, ni aucune tendance à la rotation n'ont été décelées. Il en résulte que le support inférieur de la cartouche et son dispositif de centrage peuvent être simples et ne pas pénaliser les performances aérodynamiques et neutroniques du canal.

La tenue au cyclage thermique [13] des gaines EdF.2, EdF.3 et EdF.4 a été étudiée dans 5 boucles conçues pour cette étude. On a utilisé deux types de cyclage : violent, amplitude 450 °C $\rightleftarrows$ 50 °C et vitesse de refroidissement sur ailette de 80 °C durant la première seconde, et faible, amplitude 450 °C $\rightleftarrows$ 420 °C et vitesse de refroidissement de 2 °C durant la première seconde. Dans les deux cas les mêmes déformations de gaine ont été obtenues : avec le cyclage faible il faut simplement multiplier le nombre de cycle par 20 pour avoir approximativement les mêmes résultats qu'avec le cyclage violent.

Le profil EdF.2, à ailettes hélicoïdales de hauteur relativement faible (6 mm), n'a pas présenté de difficulté au cyclage thermique. Par contre le type de profil retenu pour EdF.3 et EdF.4, dit à "flancs plans" a nécessité une étude poussée pour éviter le frisage du sommet des ailettes. En effet, celles-ci sont rectilignes, relativement hautes (8 mm), longues et fines (0,5 mm au sommet), facteurs tous défavorables à la tenue au cyclage thermique. On a trouvé une solution en diminuant la longueur de ces ailettes (par augmentation du nombre de secteurs - porté à 8 au lieu de 6 dans EdF.2 - et de l'angle des ailettes par rapport à l'axe de la gaine) et en ménageant au sommet de celles-ci, sur une hauteur de 2 mm, des saignées convenablement étudiées (voir figure 1).

Par ailleurs un progrès important a été fait entre EdF.2 et EdF.3 : les centreurs, destinés à maintenir la cartouche au milieu de sa chemise, ont été incorporés à la gaine. On file une ébauche, comprenant 4 grandes ailettes longitudinales, puis on usine les petites ailettes d'une part, les centreurs d'autre part. Ce dernier usinage a dû être soigneusement étudié pour éviter deux phénomènes facheux au cyclage thermique :

- la rupture des soudures de bouchon au droit des centreurs, due aux efforts que ceux-ci, lorsqu'ils sont prolongés jusqu'aux extrémités de la cartouche, viennent exercer sur le cordon de soudure. Ceci est maintenant évité en leur donnant un profil convenable aux deux extrémités.
- la tendance au frisage du sommet des centreurs, évitée en les coupant en 4 tronçons, séparés par une fente de quelques millimètres de largeur.

60

Au total les avantages actuels du profil "chevron flancs plans" sont tels que, pour le projet INCA d'élément annulaire 77 x 95 mm, on n'a pas hésité à le choisir pour la gaine externe, qui aura 16 ou 24 secteurs et 4 centreurs incorporés.

4. CHEMISES EN GRAPHITE

A partir d'EdF.2, les éléments combustibles français de la filière comportent une chemise en graphite, ce qui limite les efforts verticaux auxquels ils sont soumis et leur assure une double sécurité : vis à vis du déchargement, qui reste toujours possible même s'ils sont déformés, et vis à vis des manutentions en pile, puisqu'ils ne sont pas saisis directement par la pince de déchargement et qu'ils sont protégés contre les chocs. On estime que la présence de ces chemises devrait permettre le réarrangement des cartouches irradiées d'où un gain possible important en durée de vie totale d'une charge donnée.

A ces avantages généraux s'ajoutent, pour EdF.4 et le projet INCA, une nécessité particulière : dans ces deux réacteurs le sens de circulation gazeuse est en effet inversé par rapport aux réacteurs précédents, le CO_2 circulant de haut en bas à l'intérieur des canaux. Il en résulte d'une part que les efforts aérodynamiques du gaz sur les cartouches viennent s'ajouter - au lieu de se retrancher - à la pesanteur, d'autre part que les cartouches les plus chaudes sont celles du bas des canaux. Des supports individuels de cartouche sont donc pratiquement indispensables pour de tels réacteurs, si l'on ne veut pas que les éléments du bas s'écrasent sous le poids des éléments situés au-dessus.

5. PROBLEMES PARTICULIERS AUX ELEMENTS ANNULAIRES

5.1 Le premier problème que posent les éléments annulaires est celui du comportement de leur gaine interne, tant durant l'opération de gainage que durant le fonctionnement en pile [14] . En effet, le coefficient de dilatation de la gaine étant supérieur à celui de l'uranium, si l'on gaine l'élément combustible à 400 °C puis qu'on le laisse refroidir, la gaine interne risque de décoller de l'uranium, si une pression suffisante ne vient pas l'appliquer. Cette pression est donnée par la formule :

$$p = \frac{2\,n\,e}{D}$$

e est l'épaisseur de la gaine, D son diamètre et n la contrainte interne due à la déformation élastique nécessaire pour rattraper le jeu uranium-gaine.

Pour les éléments du projet INCA, la forte pression envisagée (40 kg/cm^2) et le fort diamètre intérieur (75 mm) font que la valeur de n correspondant au décollage est assez élevée (7,5 kg/mm^2), ce qui ne peut être obtenu que nettement en-dessous de 100 °C quel que soit le jeu initial entre la gaine et l'uranium après l'opération de gainage et compte tenu de la plasticité du magnésium. Comme la température d'entrée du gaz est supérieure à 200 °C, il n'y a donc dans ce réacteur aucun risque de décollement de la gaine interne en fonctionnement normal.

5.2 Le second problème est celui de l'extrémité inférieure de la cartouche, qui doit résister aux importantes forces verticales mentionnées au paragraphe 4 ci-dessus. Or la surface portante à la base du tube uranium est faible par rapport aux éléments type EdF.2 - EdF.4, puisqu'il n'y a pas de pastille fermant le tube et que l'on doit ménager l'espace de deux cordons de soudure au lieu d'un. Des études particulières sont donc en cours pour renforcer cette extrémité inférieure. Elles ont d'ores et déjà abouti à des solutions satisfaisantes.

5.3 D'autres problèmes se posent pour le fonctionnement des éléments en pile : en particulier la température maximum que l'on peut tolérer sur la gaine interne et la chute de température au contact entre les gaines interne et externe et l'uranium. Ce dernier facteur, en particulier, demande a être serré de très près car tout l'équilibre thermique entre la fraction de chaleur dégagée à l'intérieur du tube et celle dégagée à l'extérieur en dépend : les études [15] ne doivent plus se limiter comme pour les tubes fermés aux conditions de l'élément le plus chaud, mais à celles de tous les éléments de haut en bas du canal.

5.4 Enfin se pose le problème du prix de revient de ces éléments combustibles. Les premiers essais effectués montrent qu'il ne devrait pas y avoir de problèmes sérieux pour la fabrication des gaines ainsi que la coulée et le traitement thermique des tubes uranium : les taux de rebuts obtenus lors de ces opérations sont d'ores et déjà acceptables. L'usinage interne des tubes présente des difficultés qui augmenteront le prix de revient. Cependant, compte tenu du poids d'uranium contenu dans chaque élément (25 kg environ pour le tube INCA) le prix de revient ramené au kilogramme contenu, devrait être inférieur à celui des éléments plus classiques, type EdF.2 par exemple.

6. CONCLUSION

La politique choisie en France, pour le développement de la filière uranium naturel - graphite - CO_2, consiste à essayer de pousser cette filière à son degré de simplification ultime possible, par réduction du nombre de canaux et du nombre d'éléments.

Cette politique conduit en ce moment le C.E.A. et l'EdF à étudier le projet INCA de réacteur à éléments combustibles annulaires. Ces éléments demandent une somme très importante d'études, dans tous les domaines, mais l'effort entrepris devrait trouver sa récompense dans le saut en avant, la "mutation" qu'il peut permettre de faire faire aux réacteurs EdF.

Par ailleurs, cet effort sur l'élément annulaire ne signifie nullement que les éléments plus classiques à tubes fermés type EdF.2 - EdF.4, soient abandonnés : nous avons vu en particulier que les études se poursuivent pour améliorer la résistance des tubes d'uranium ainsi que les performances et la robustesse des gaines chevron. Des éléments plus poussés que l'élément EdF.3 - EdF.4 peuvent donc être envisagés, lorsque ces études auront abouti et qu'une expérience plus complète de la tenue des éléments sous irradiation, aura été acquise.

- mars 1964 -

REFERENCES

[1] BOURGEOIS J., SAITCEVSKY B. - Développement des réacteurs à graphite et uranium naturel - Conf. n° 6.

[2] LEHMANN J., AZAM N. - Germination des phases β et α dans les alliages U-Mo - J.M.N. 10 n° 2 - p. 73 - 1963.

[3] LEHMANN J., DECOURS J. - Morphologie du pseudo grain α des alliages U-Mo dans un état proche de l'équilibre - J.M.N. 1964.

[4] LEHMANN J. - DECOURS J. - Propriétés des alliages U-Mo de faibles teneurs (0,5 à 3 %) utilisables comme matériaux combustibles - Rapport C.E.A.

[5] STOHR J.A. - Les éléments combustibles des réacteurs modérés au graphite refroidis au CO_2 sous pression - Atompraxis - 71ème année, n° 5, mai 1961.

[6] DELPEYROUX P., SIFFERLEN R., THOMAS DE MONTPREVILLE C., VIALLET H., - Tenue des tubes uranium métallique à la pression extérieure - Rapport C.E.A.

[7] ENGLANDER M., et al. - Effets de l'irradiation neutronique sur divers combustibles de la filière graphite-gaz - Conf. n°67 .

[8] AUBERT H., GERLAND J. - L'affinage du grain de l'uranium à l'aide de faibles additions et de traitements thermiques - Mémoires Sc. Rev. Métallurgie LVI n° 4, 1961.

[9] AUBERT H. Alliage U-Cr à 0,1 % en poids de chrome - Mémoires Sc. Rev. Métallurgie LVIII n° 4, 1961.

[10] LANIESSE J., AUBERT H. - Développement récent des alliages d'uranium à faibles teneurs - Rapport C.E.A.

[11] GELIN P., MILLIAT J.P. - Etudes aérodynamiques et thermiques des gaines d'éléments combustibles refroidis par gaz - Conf. n° 20.

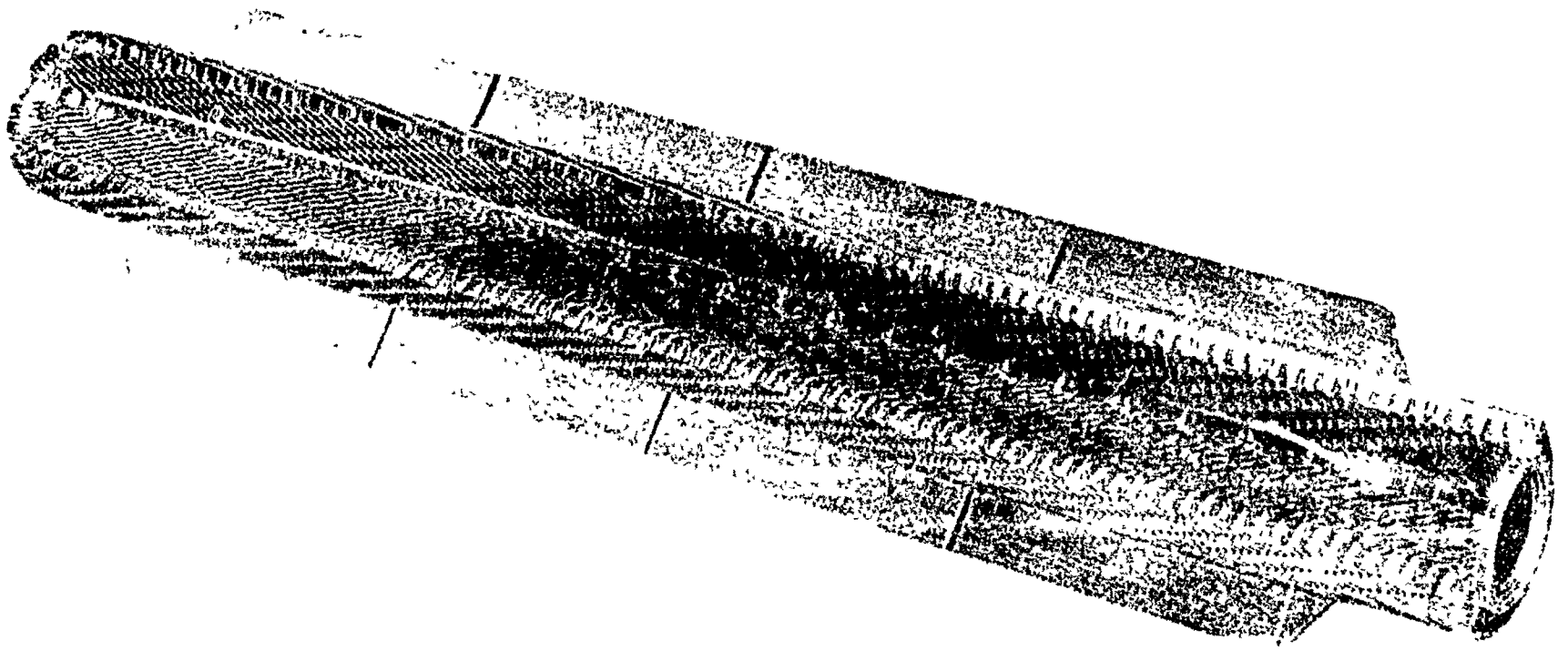
60

[12] BOUSSARD R., JEANPIERRE G. - Les éléments combustibles français de la filière à uranium naturel, graphite et CO_2 - Expérience acquise - Perspectives d'avenir - I.A.E.A. - Conf. Vienne 4-10 juin 1963.

[13] GAUTHRON M., BOUDOURESQUES B., DELPEYROUX P. - Contribution à l'étude de la déformation des gaines et ailettes pour élément combustible de réacteur graphite gaz au cours du cyclage thermique - Rapport C.E.A.

[14] BOUDOURESQUES B., LESTIBOUDOIS G. - Etude de la tenue des gaines internes pour élément à refroidissement interne et externe - Rapport C.E.A.

[15] FAUSSAT A., MICHEL M., LEVENES G. - Etude de la chute thermique au contact uranium gaine pour les éléments combustibles de réacteur graphite gaz - Rapport C.E.A.



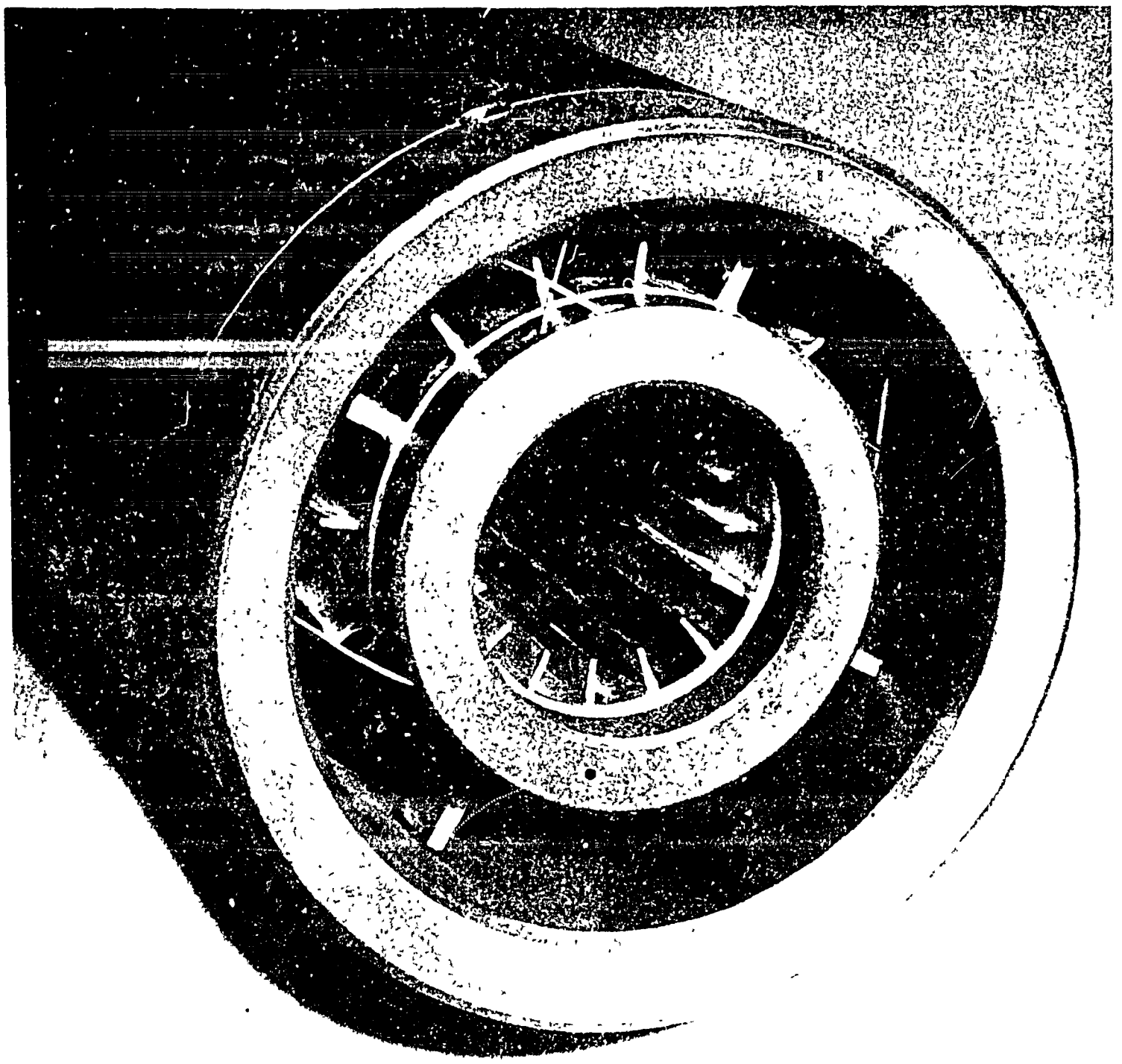
Elément combustible type "EdF3. EdF4".

Gaine à ailettes chevrons flancs plans centreurs incorporés

Tube d uranium 23 x 43mm en alliage à 1,1% de Mo.

FIGURE : 1

60

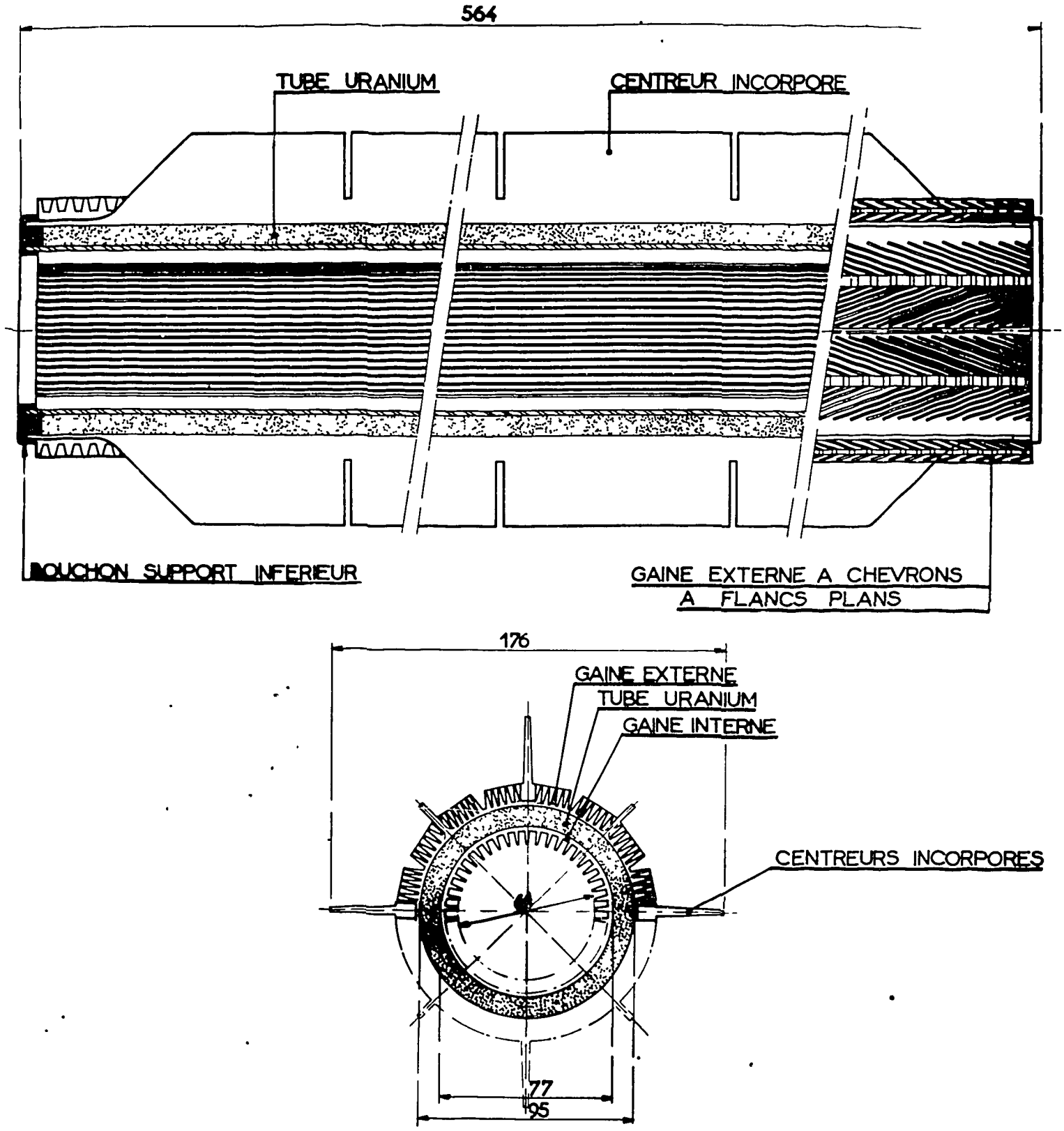


Elément combustible type annulaire à refroidissement externe et interne avec sa chemise en graphite.

Cet élément, à tube 54x70 mm, est destiné a une irradiation experimentale dans EdF2

FIGURE : 2 .

PROJET I.N.C.A



PLAN DE L'ELEMENT ANNULAIRE

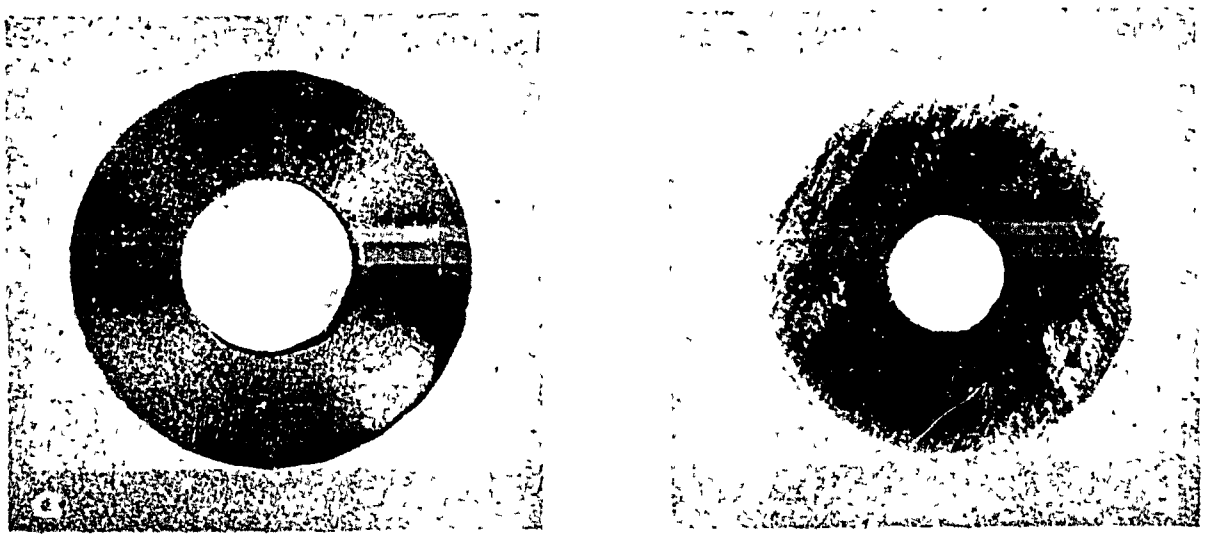
GAINE EXTERNE A AILETTES EN CHEVRONS
A FLANCS PLANS ET CENTREURS INCORPORES

GAINE INTERNE A AILETTES LONGITUDINALES

TUBE D'URANIUM 77x95 EN ALLIAGE TRAITE EN PHASE β

FIGURE 3

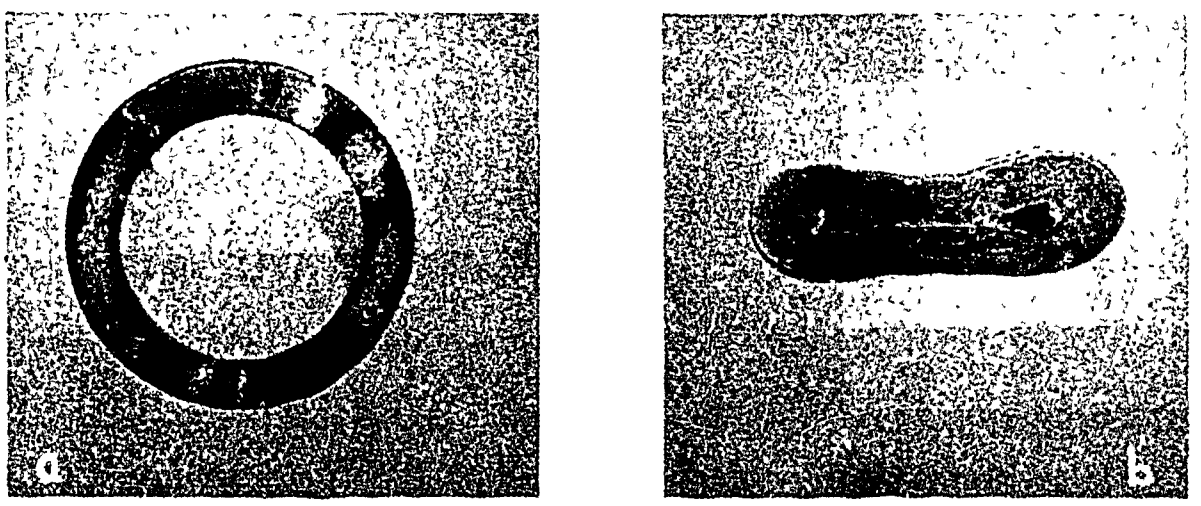
Tubes d'uranium à 1,1% de molybdène cyclés thermiquement aux environs de 590° sous pression extérieur de 30 Kg/cm²



TUBE 18x40 mm

(a) coupe avant cyclage
(b) coupe aprés 3000 h de cyclage thermique

FIGURE : 4 .



TUBE 25x35 mm

(a) coupe avant cyclage

(b) coupe après 1500 h de cyclage thermique

FIGURE : 5 .

FIN