

CEA 1659 - LEO M. B. , MAILLARD M. L.

REACTEURS NUCLEAIRES (1960).

Sommaire. - Les premiers réacteurs industriels plutonigènes français G1 - G2 - G3 du Centre de Marcoule comportent une installation de récupération d'énergie.

La production d'électricité de G1 ne compense pas l'énergie dépensée par ailleurs pour le fonctionnement de l'ensemble, par contre, G2 et G3 doivent fournir chacun une puissance de 25 à 30 MW au réseau national d'Electricité de France.

Cette puissance est modeste, mais l'expérience acquise grâce à ces réacteurs est très grande et c'est grâce à elle qu'il nous sera possible de mettre en exploitation les réacteurs énergétiques EDF1 - EDF2 - EDF3.

Le mémoire décrit comment, avant tout démarrage du réacteur, les essais effectués, en particulier ceux concernant l'installation de récupération d'énergie et le caisson, ont permis d'abréger la phase de montée en puissance.

CEA 1659 - LEO M. B. , MAILLARD M. L.

NUCLEAR REACTORS (1960).

Summary. - The first French plutonium-making reactors G1, G2 and G3 built at Marcoule research center are linked to a power plant.

The G1 electrical output does not offset the energy needed for operating this reactor. On the contrary, reactors G2 and G3 will each generate a net power of 25 to 30 MW, which will go into the EDF grid.

This power is relatively small, but the information obtained from operation is great and will be helpful for starting up the power reactor EDF1, EDF2 and EDF3.

The paper describes how, previous to any starting-up operation, the tests performed, especially those concerned with the power plant and the pressure vessel, have helped to bring the commissioning date closer.

PREMIER MINISTRE
COMMISSARIAT A
L'ÉNERGIE ATOMIQUE

REACTEURS NUCLEAIRES

par

M. B. LEO

Electricité de France

et M. L. MAILLARD

Commissariat à l'Energie Atomique

Rapport CEA N° 1659

1960

CENTRE D'ÉTUDES
NUCLÉAIRES DE SACLAY
SERVICE DE DOCUMENTATION
Boîte postale n° 2 - Gif-sur-Yvette (S.-et-O.)

- Rapport C. E. A. n° 1659 -

REACTEURS NUCLEAIRES

par

M. B. LEO

**Directeur adjoint, Région d'Equipement Thermique Nucléaire n° 1
Electricité de France**

et M. L. MAILLARD

**Chef du Service de Construction des Piles
Commissariat à l'Energie Atomique**

CONFERENCIA MUNDIAL DE LA ENERGIA



WORLD POWER CONFERENCE
SECTIONAL MEETING

CONFERENCE MONDIALE DE L'ENERGIE
SESSION PARTIELLE

SESION PARCIAL DE MADRID 5 9 JUNIO 1960

PONENCIA
PAPER
RAPPORT

IV A / 4

FRANCIA
FRANCE
FRANCE

REACTEURS NUCLEAIRES

M.B. LEO,

Directeur adjoint, Région d'Équipement Thermique Nucléaire N° 1
Electricité de France

M.L. MAILLARD,

Chef du Service de Construction des Piles, Commissariat à l'Énergie
Atomique

1. Le programme technique de la session partielle de la Conférence mondiale de l'Énergie (Madrid 1960) a pour thème: "les procédés pour résoudre les problèmes que pose l'insuffisance d'énergie" et il est bien connu que l'on espère, à bref délai, compter parmi ces procédés la production rentable d'énergie électrique par l'utilisation de l'énergie nucléaire dans des réacteurs à l'échelle industrielle.

Aussi bien, le présent mémoire n'a-t-il pas pour but de montrer que ce souhait peut être réalisé par la filière des réacteurs de puissance à Uranium naturel, graphite et gaz sous pression, dans laquelle la France s'est engagée depuis 1953. Il souhaite montrer comment, pour les réacteurs faisant partie de la première tranche du programme associé à cette filière, les essais peuvent permettre de hâter le moment où l'énergie électrique d'origine nucléaire résoudra le *problème de l'énergie*.

2. Toute installation de production d'énergie nucléaire comporte un réacteur nucléaire auquel est associée une usine de production d'énergie électrique utilisant la vapeur produite directement ou indirectement par le réacteur. Les problèmes posés par l'étude, la construction et l'exploitation de l'usine de production d'énergie sont peu différents de ceux relatifs aux centrales thermiques classiques. Les différences essentielles proviennent des conditions médiocres de température et de pression de la vapeur fournie par les réacteurs nucléaires, dans l'état actuel de la technique. Les quantités

de vapeur nécessaires pour produire une puissance donnée étant sensiblement plus élevées que les quantités correspondantes d'une centrale classique, moderne, à haute pression, il en résulte que la turbine, le condenseur et leurs organes accessoires doivent être plus largement dimensionnés et que la consommation spécifique d'eau de refroidissement est sensiblement plus forte.

Les quelques centrales de production d'énergie nucléaire en exploitation dans le monde entier ne sont en service que depuis un petit nombre d'années et les centrales en construction ont toutes plus ou moins un caractère expérimental. Mais les données de la physique nucléaire imposent des dimensions minimales au réacteur et d'autre part l'évolution rapide de la technique et le souci de la diminution des prix au kW installé conduisent à une augmentation rapide de la puissance des réacteurs. De ce fait, les premières centrales réalisées avaient déjà une puissance de quelques dizaines de MW (é) (1). Les centrales en cours de réalisation atteignent et dépassent 100 MW (é) et la réalisation de centrales de plusieurs centaines de MW est envisagée à brève échéance. On se trouve donc, avant que certaines questions techniques soient totalement résolues du côté nucléaire, en présence d'installations de production d'énergie de grande puissance et de grandes dimensions.

D'autre part, les informations nouvelles que procure la mise en service d'une centrale nucléaire, sont en général immédiatement utilisables pour l'amélioration des projets de nouvelles centrales en cours d'étude. C'est dire qu'elles sont attendues impatiemment et que tout est mis en œuvre pour démarrer la centrale dès l'achèvement des travaux.

De gros efforts sont faits actuellement pour raccourcir les délais de construction, et ceci parfois aux prix de lourdes charges supplémentaires. Ces efforts ne doivent pas être anihilés par des délais de démarrage excessifs.

Enfin, les à-coups inévitables du démarrage de l'installation de production d'énergie ne doivent pas se répercuter sur la stabilité du réacteur.

Or, les essais et le démarrage du réacteur proprement dit sont une opération délicate et de longue haleine nécessitant l'intervention de nombreux ingénieurs spécialisés dans des techniques très variées. Il est indispensable que dans cette période de mise au point, le démarrage de la centrale de production d'énergie électrique ne vienne pas perturber les opérations de démarrage du réacteur. C'est donc dès le début de l'élaboration du projet que l'on devra prévoir pour la centrale des dispositions telles que ces opérations puissent se faire avec le plus de souplesse et de rapidité possible.

3. La filière des réacteurs français de puissance à Uranium naturel, graphite et gaz, comprend deux tranches:

— Les réacteurs plutonigènes G1 - G2 - G3 de Marcoule, auxquels ont été associées des *installations de récupération d'énergie*.

(1) MW(é) = MW électriques nets fournis au réseau.

— Les réacteurs industriels EDF 1 - EDF 2 - EDF 3 d'Avoine dont le but est la *production d'énergie*.

Nous ne parlerons ici que des ensembles piles et installations de récupération d'énergie associés des réacteurs de Marcoule.

4. L'ensemble industriel G1

L'ensemble industriel G1 (2) est réalisé autour de la première pile française utilisant le graphite comme modérateur. Dans le but de démarrer rapidement l'approvisionnement de la France en matière fissile (plutonium) sur une échelle industrielle, les solutions techniques ont été choisies aussi simples que possible: le fluide extrayant la chaleur des barreaux d'uranium naturel, gainés de magnésium, est de l'air en circuit ouvert alimentant la pile par une fente médiane.

Les modestes propriétés du gaz de refroidissement ne permettent pas de récupérer la totalité de l'énergie dépensée par ailleurs pour sa mise en circulation.

Il n'en reste pas moins que de nombreuses expériences de physique à faible flux neutronique, puis des essais en puissance ont pu être conduits dès 1956 (3) de façon, d'une part à préciser les éléments expérimentaux nécessaires pour améliorer le calcul des réseaux à graphite et certains points de théorie, d'autre part à mieux connaître le réacteur, ses éléments et ses accessoires, pour en assurer le fonctionnement correct, et parfaire les réglages utiles.

Grâce à cette installation, les techniciens d'Electricité de France et ceux du Commissariat à l'Énergie Atomique ont éprouvé la joie de produire les premiers kWh nucléaires en France et probablement en Europe Continentale, le 28 septembre 1956.

Grâce à elle encore, des renseignements extrêmement précieux ont pu être accumulés pendant le premier recuit de l'empilement graphite, pour guérison de l'effet Wigner, en septembre 1958.

Au total, l'expérience acquise par le fonctionnement de cette pile depuis 1956 (4) a été extrêmement profitable et a permis de réaliser les deux piles plutonigènes G2 et G3 de grande puissance, préfiguration des piles industrielles EDF 1 - EDF 2 - EDF 3.

5. Les ensembles industriels G2 - G3

Les ensembles industriels G2 - G3 (5) ont été réalisés autour de piles plutonigènes de grande puissance conçues de façon à rendre utilisable, pour la production d'énergie électrique, la chaleur qu'elles dégagent. Les deux ensembles sont identiques.

(2) Conférence de Genève 1955, p. 333, de MM. CHAMBADAL et PASCAL.

(3) Centre d'Études Nucléaires de Saclay. Rapport CEA, n.° 670. Réacteur G1. Service de Documentation, boîte postale n.° 2, Gif s/Yvette (S. et O.).

(4) Conférence de Genève 1958, p. 950, de MM. SCALLIET, ROUVILLE et PASCAL.

(5) *Bulletin d'Informations scientifiques et techniques*. CEA, n.° 20, Août 1958. Compagnie Française d'Éditions, 40, rue du Colisée, Paris.

5.1. Le réacteur

Le combustible est de l'Uranium naturel sous la forme de barreaux pleins, gainés de tubes de magnésium zirconium munis d'ailettes longitudinales. Les canaux de graphite contenant ces éléments combustibles sont horizontaux.

Le fluide retenu pour l'extraction de chaleur est du gaz carbonique sous la pression absolue de 15 kg/cm².

Le caisson contenant le coeur actif de la pile et tenant la pression est en béton précontraint (6). Une tôle continue doublant la face interne du béton permet de réaliser l'étanchéité. Les piles ont été conçues de façon à pouvoir être chargées en combustible neuf et déchargées en combustible irradié, en marche et sous pression. Le système de chargement fonctionne par sas permettant l'introduction des cartouches neuves par l'une des faces du caisson et commandant la sortie sur la face opposée, par gravité, des cartouches irradiées.

Outre le circuit *primaire* d'extraction de chaleur, il a été réalisé un circuit *secondaire* destiné à assurer le refroidissement des structures internes du caisson et, en particulier, de la peau d'étanchéité.

Le fluide primaire est véhiculé à l'aide de deux turbosoufflantes alimentées en vapeur par les échangeurs de l'ensemble. Un motosoufflante assure la circulation du fluide secondaire. Des motosoufflantes primaires auxiliaires assurent le démarrage de l'installation.

De façon à tirer le maximum de puissance de l'ensemble, compte tenu de la réserve de réactivité disponible, il a été prévu un aplatissement radial du flux neutronique dans la région centrale par introduction préliminaire de canaux d'absorbants (thorium, fer, matériaux pour production de radioéléments), et, accessoirement, 2 diamètres de cartouches différents.

5.2. L'installation de récupération d'énergie

L'installation de récupération d'énergie est réalisée de façon à éviter toute répercussion, sur le fonctionnement neutronique du réacteur, d'éventuelles perturbations sur le circuit d'utilisation de la vapeur produite.

C'est Electricité de France qui a été chargée d'étudier, de réaliser, de mettre au point, de démarrer et d'exploiter l'installation de production d'énergie, installation qui s'étend depuis les échangeurs de chaleur inclus jusqu'au transformateur de puissance inclus.

Le gaz carbonique à 15 kg/cm² de pression ayant extrait la chaleur du réacteur G2 alimente par deux circuits à des températures légèrement différentes une batterie de quatre échangeurs de chaleur entièrement indépendants, c'est-à-dire que chaque échangeur forme par lui-même un ensemble qui peut fonctionner même en cas d'indisponibilité des échangeurs voisins (Fig. 1).

(6) Supplément aux *Annales de l'Institut Technique du Bâtiment et des Travaux Publics*, Juillet-Août 1959. Caissons en béton précontraint des Réacteurs G2 et G3, par MM. BELLIER et TOURASSE. Documentation technique du bâtiment, 6, rue Paul Valéry, Paris.

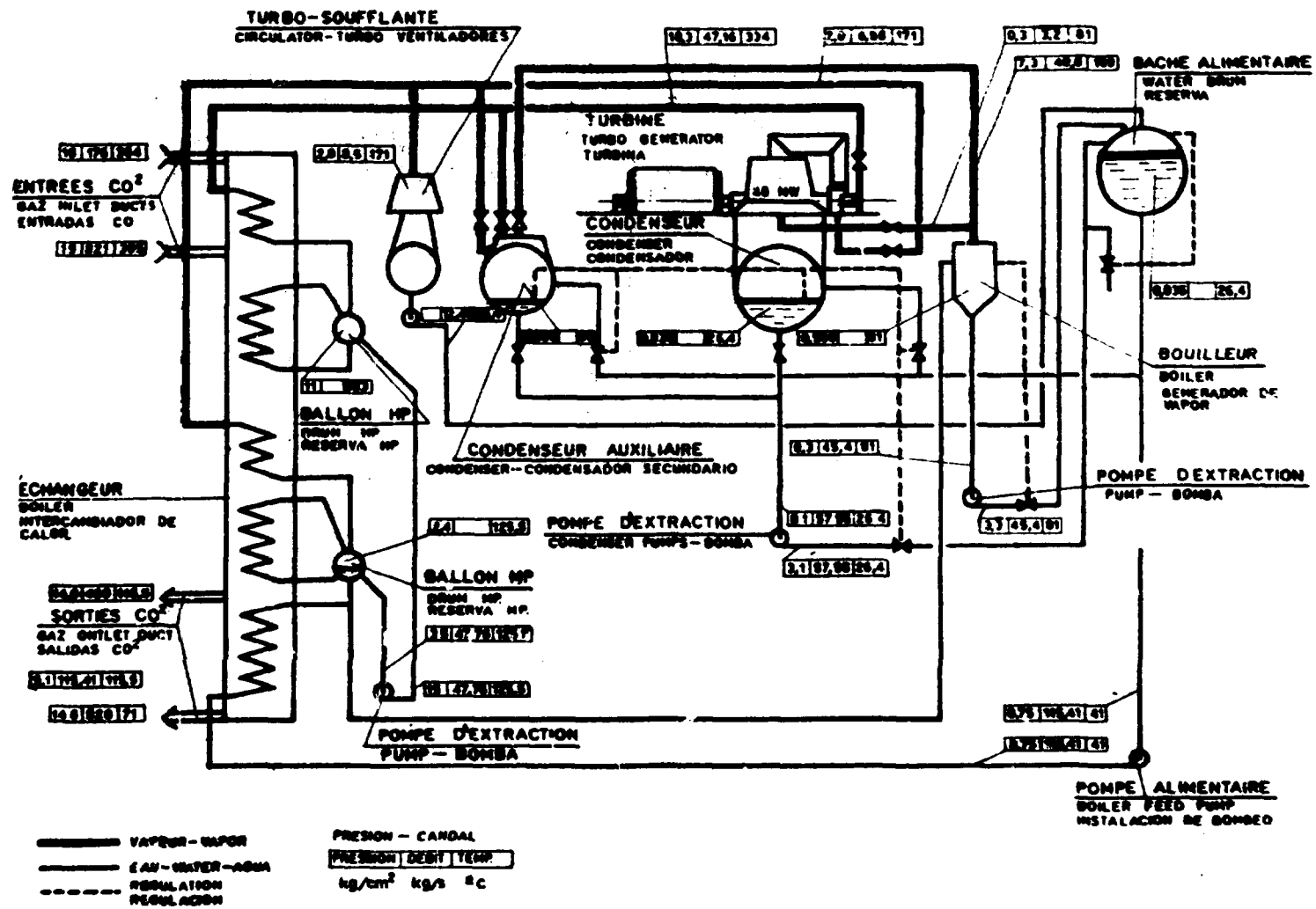


FIGURE 1

Installation de récupération d'énergie, schéma.
 Energy recuperation plant, diagram.
 Instalación de recuperación de energía, esquema.

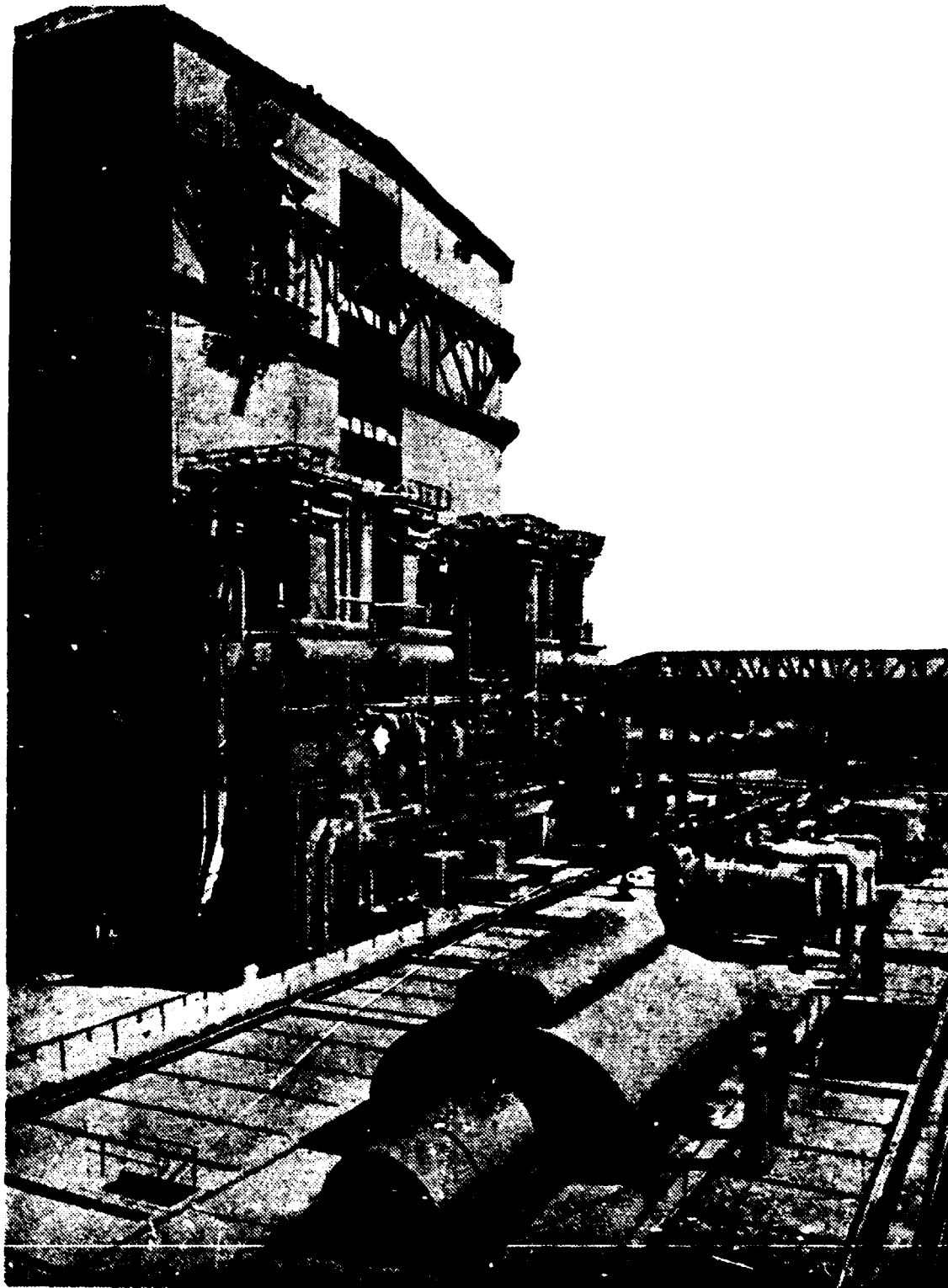


FIGURE 2

Installation de récupération d'énergie, photographie.

Energy recuperation plant, photograph.

Instalación de recuperación de energía, fotografía.

Ces échangeurs fournissent de la vapeur à deux pressions différentes; la haute pression alimente uniquement la turbine, et la basse pression alimente la turbine et en priorité les turbosoufflantes assurant la circulation du CO₂ pour le refroidissement de la pile (Fig. 2).

Le fonctionnement de la turbine est rendu indépendant de celui du réacteur par un détendeur désurchauffeur lié au condenseur principal et capable d'absorber la totalité de la vapeur produite par les échangeurs, ce qui permet, en cas de disparition instantanée de la puissance électrique, de transférer immédiatement la vapeur sur le circuit de détente sans provoquer de variation brusque de température sur le réacteur. En outre, un deuxième détendeur-désurchauffeur associé à un condenseur auxiliaire permet d'absorber la totalité de la puissance en cas d'indisponibilité de l'ensemble principal. Cette installation permet d'effectuer divers essais sans qu'il soit nécessaire de modifier la marche du réacteur, notamment la mise au point des différentes chaînes (régulation et évacuation des calories).

6. Les essais de l'ensemble industriel G2

Il n'entre certes pas dans le cadre de ce mémoire de rappeler tous les essais de mise au point, de recette provisoire, de bon fonctionnement, qui ont permis d'atteindre, pour l'ensemble industriel G2, la pleine puissance thermique. Après un bref rappel des principaux résultats obtenus, nous examinerons plus en détail dans les cas particuliers de l'installation de récupération d'énergie et du caisson en béton précontraint, comment ces résultats ont pu être atteints.

Rappelons que G2 est la première pile de puissance dotée d'un système de *chargement-déchargement* des éléments combustibles sur la pile en marche et sous pression. Cette installation s'est révélée extrêmement utile, car elle a permis d'éliminer aisément, sans arrêter la pile, les quelques cartouches fuyardes repérées par l'installation de détection de rupture de gaine. Il convient d'ailleurs de remarquer, de ce point de vue, que l'ensemble des cartouches s'est comporté d'une façon tout à fait satisfaisante, le taux de rupture de gaine étant extrêmement bas.

L'étanchéité d'un circuit aussi complexe (environ 5.000 m³ de gaz carbonique à 15 kg/cm²) s'est révélée satisfaisante; une installation de récupération des fuites doit permettre de baisser encore sensiblement la consommation en CO₂.

Des puissances thermiques de l'ordre de 215 à 220 MW ont pu être maintenues pendant de longues périodes. Il est à remarquer que ce résultat n'a pu être atteint qu'au détriment de la puissance électrique délivrée au réseau (alors de l'ordre de 27 MW (é)), la fraction de vapeur supplémentaire pour augmenter le débit des turbosoufflantes n'étant pas "économique" du point de vue Installation de Récupération d'Énergie.

Du point de vue nucléaire, des essais ont pu être effectués, dont les résultats d'un grand nombre ne sont pas encore publiés.

7. Les essais de l'Installation de Récupération d'Energie

La mise en service de cette installation s'est faite dans des conditions particulièrement satisfaisantes de rapidité et de souplesse. Il a été possible d'utiliser immédiatement la puissance fournie par le réacteur, trois ou quatre jours seulement ayant été nécessaires pour achever les réglages qui ne pouvaient être faits sans disposer d'une puissance suffisante. Cet heureux résultat est dû à la bonne entente qui a constamment régné entre les ingénieurs d'E.D.F. et ceux du C.E.A., à l'efficacité des liaisons établies entre ces deux organismes et à un certain nombre de facteurs qu'il nous paraît intéressant de mettre en évidence.

Nous pensons que la rapidité de la mise en route résulte, outre de la conception même de l'installation (cf § 5,2).

1. du soin apporté à la mise au point de l'installation avant la montée en puissance du réacteur, rendue possible par l'utilisation d'une source auxiliaire de vapeur,
2. de la bonne formation théorique et pratique du personnel.

7.1 Mise au point préliminaire

La mise au point d'une installation à vapeur comporte un grand nombre d'opérations commençant par les opérations de nettoyage des circuits et se poursuivant par les essais individuels des diverses parties de l'installation avec relevés des caractéristiques et la mise au point de la régulation, et enfin la rotation de la turbine. Ce dernier essai est absolument indispensable pour permettre ultérieurement un démarrage rapide puisqu'il permet d'observer de façon complète le comportement de la turbine, ses vibrations, la modification des jeux nécessaires, etc. Pour G2, la turbine a pu être lancée à sa vitesse de régime de 3.000 tours/mn et l'alternateur couplé au réseau général E.D.F. plusieurs semaines avant la montée en puissance du réacteur.

Cet état de choses a été facilité par la présence, à proximité du réacteur G2, d'une source de vapeur. En effet, à quelques centaines de mètres de G2 se trouve l'usine d'extraction du Plutonium qui dispose pour le réchauffage de ses circuits d'une chaufferie composée de deux chaudières produisant de la vapeur à 35 kg/cm²-330°C et susceptible de débiter ensemble 15 tonnes/heure.

Une conduite spéciale d'une longueur de 1.100 m a été tirée entre l'usine d'extraction du Plutonium et le réacteur G2. Cette conduite peut débiter au maximum 13 tonnes/heure et elle a permis de réaliser les essais suivants:

- mise au point de la turbine principale,
- mise au point des trois turbosoufflantes principales du réacteur,
- lessivage et mise en état de conservation des échangeurs,
- réglage des chaînes de détente,
- mise au point des chaînes de régulation, des économiseurs et du bouilleur,
- réglage de l'alternateur et mise au point des chaînes de protection.

Ces réglages et mises au point nécessitent un délai dont l'ordre de grandeur est de quatre mois. Une fraction appréciable de ces délais se serait ajoutée aux délais de la mise au point du réacteur, si E.D.F. n'avait pas disposé d'une source de vapeur auxiliaire.

Sur un plan plus général la préparation des essais de démarrage de la centrale E.D.F. 1 a été poussée très loin dans le détail. L'ensemble de l'installation a été découpé en une soixantaine de circuits élémentaires. Pour chacun d'entre eux un dossier d'essais a été rédigé; il précise dans les moindres détails les essais à effectuer, les conditions d'exécution, le programme, le personnel et le matériel nécessaires.

D'autres essais portant sur des ensembles de circuits (par exemple les essais statiques et dynamiques des circuits principaux de CO₂) ont été étudiés dans les mêmes conditions. Tous ces essais ont été réalisés au fur et à mesure de l'achèvement des travaux de montage. Pour leur préparation une équipe d'une dizaine d'ingénieurs a été spécialement mise sur pied.

On voit que l'installation était essayée de façon aussi complète que possible le jour de la montée en puissance du réacteur. La présence à courte distance du réacteur d'une source de vapeur était une circonstance heureuse dont il était avantageux de profiter. Mais si cette installation n'avait pas existé, nous pensons qu'il aurait été de toute façon avantageux d'amener sur place une ou deux chaudières mobiles permettant de réaliser les mêmes essais. C'est d'ailleurs ce qu'E.D.F. a fait pour G1 à une époque où aucune source de vapeur n'était encore disponible sur le site et ce qu'elle se propose de faire pour la mise en service de la centrale E.D.F. 1 à CHINON (Indre-et-Loire) dont l'installation de production d'énergie sera terminée avant l'achèvement complet du réacteur.

7.2 Formation du Personnel

Pour qu'une installation nouvelle démarre dans des conditions satisfaisantes, il est indispensable qu'elle soit exploitée par un personnel suffisamment entraîné et qui connaisse bien les particularités de l'installation.

Le Commissariat ayant construit sur le site de Marcou'e le réacteur plutonigène G1, E.D.F. y avait associé une petite centrale de production d'énergie de puissance très modeste qui a commencé à fonctionner en septembre 1956 (§ 4). Cette centrale a permis néanmoins de former une petite équipe qui a pu, tout en travaillant à l'exploitation de l'usine G1, suivre dans tous ses détails la construction de la centrale de production d'énergie de G2.

Le recrutement de ce personnel a fait l'objet d'une attention particulière et son entraînement a été entrepris le plus tôt possible avant le démarrage effectif de la centrale.

En fait, la formation théorique et pratique du personnel avait commencé plus de six mois avant le démarrage.

La formation théorique s'est faite sous forme d'une cinquantaine de conférences traitant des problèmes généraux relatifs à l'énergie nucléaire et donnant une description détaillée et complète de la centrale, chaque description étant suivie de visites détaillées des divers appareils et circuits.

Le personnel était entraîné à des exercices de démarrage et d'exploitation "à blanc" et était ainsi familiarisé avec les gestes qu'il aurait à faire

plus tard. Entraîné de cette manière, le personnel E.D.F. s'est révélé dès les premiers jours parfaitement apte à exploiter efficacement et dans les meilleures conditions l'installation de production d'énergie de G2.

8. Essais réalisés à l'occasion de la construction des caissons de G2 et de G3

La décision de réaliser les enveloppes de pression de G2 et de G3 en béton précontraint date de l'été 1955. Accueillie avec un certain scepti-

FIGURE 3

Caïsson de réacteur.
Pressure vessel.
Cámara del reactor.

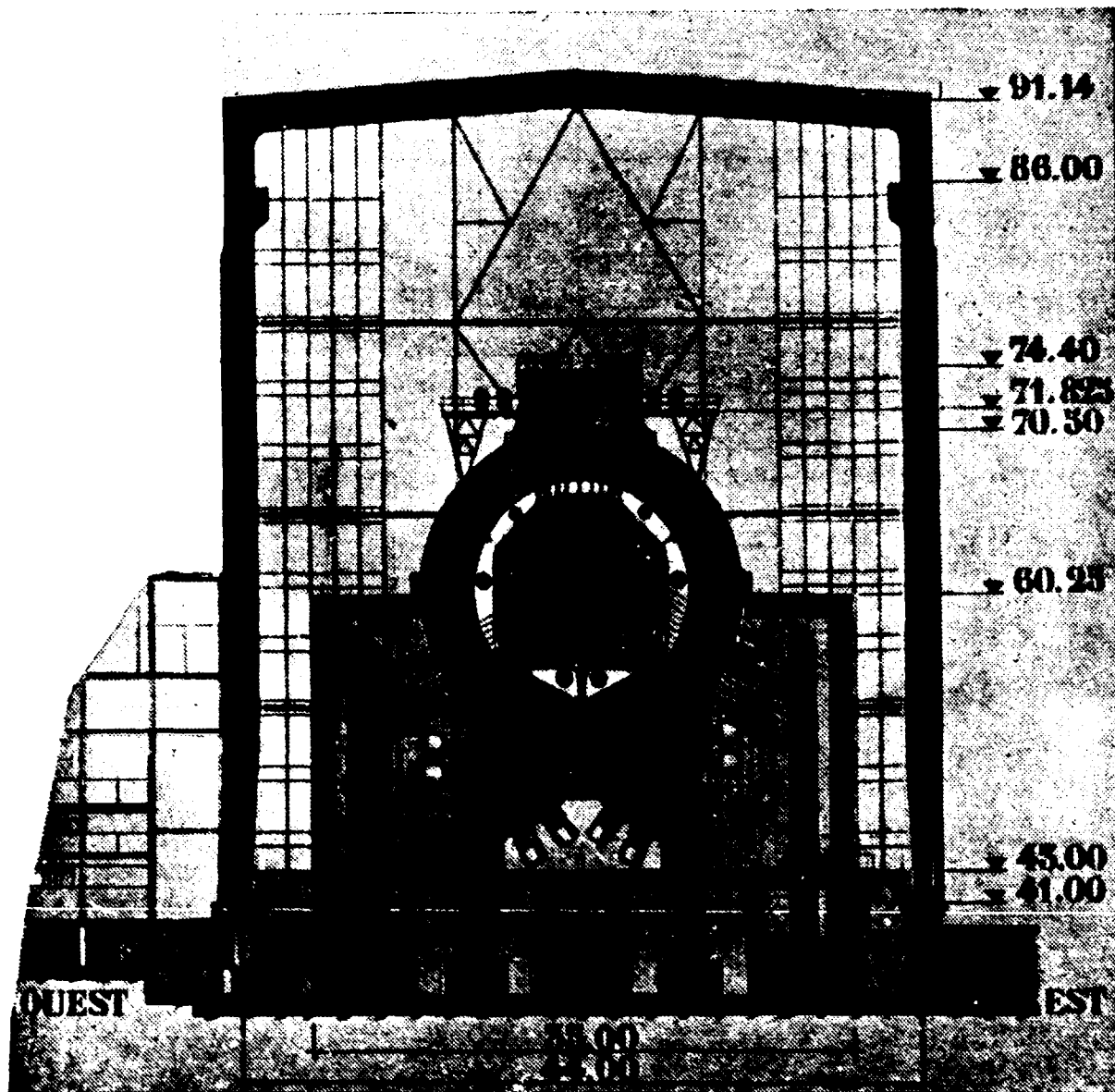


FIGURE 3a

Coupe sur toboggans, vue du Sud.
Section of inclined planes from South side.
Sección sobre los planos inclinados, vista desde el Sur.

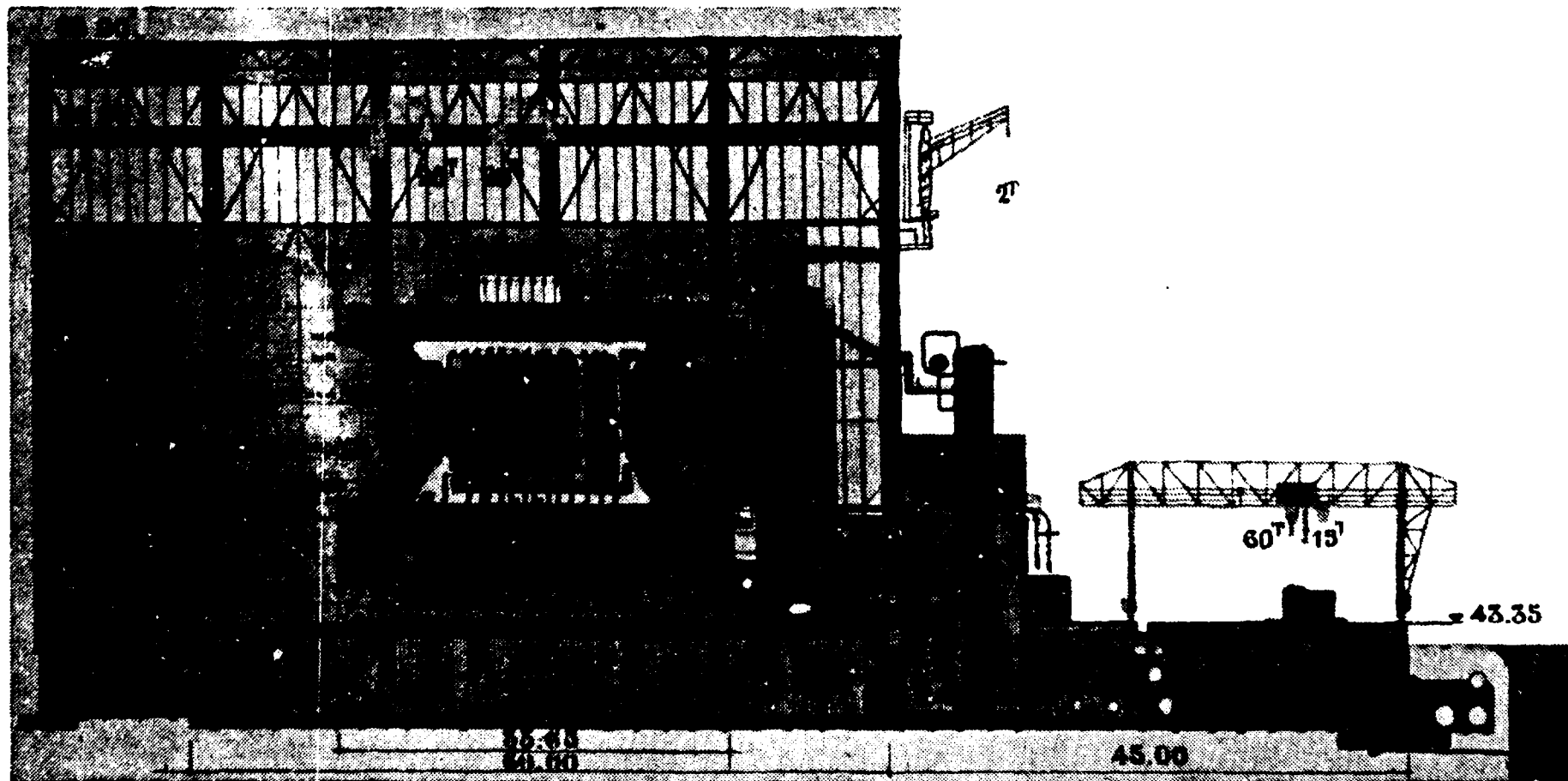


FIGURE 3b

Coupe longitudinale suivant l'axe.
 Longitudinal section through the axis.
 Sección longitudinal según el eje.

cisme, cette entreprise a fait aujourd'hui ses preuves puisqu'elle a pu être menée à son terme, la mise en service des réacteurs G2 et G3.

Il n'entre pas dans notre propos de balancer les avantages et les inconvénients des caissons en béton précontraint en parallèle avec d'autres possibilités de réalisation. Nous voudrions seulement ici faire part de l'expérience acquise tant au stade de la construction que de la mise en service et décrire les essais par lesquels nous avons acquis cette expérience.

Au stade du projet, les données et les principes de construction étaient simples: corps cylindrique, fonds hémisphérique; même les câbles de 1.200 tonnes de force unitaire, étaient, sinon classiques, du moins déjà employés dans la stabilisation des grands barrages.

Nous ne voudrions pas dire que la mise en oeuvre apparaissait alors particulièrement simple, mais en fait la seule difficulté théorique venait de la disposition des cerces et du frottement inévitable sur le béton qui en résultait (Fig. 3).

Avec un coefficient de frottement de 0,20 par exemple, on perdait 60 % de la tension de l'extrémité tendue à l'ancrage fixe. A moins d'augmenter considérablement la force nominale des cerces, il était nécessaire de réduire au minimum le coefficient de frottement.

La solution préconisée consiste à fixer au câble un patin, lequel glisse sur une glace scellée avec précision sur le béton.

Des essais effectués au Conservatoire National des Arts et Métiers, permirent de contrôler la validité de la solution: patin et glace en fonte à graphite sphéroïdal usinée et sulfunisée, interposition de graisse au bisulfure de molybdène retenue par un joint torique encastré partiellement dans le patin.

Un bas coefficient de frottement et une impossibilité de grippage, même à sec, tels étaient les résultats obtenus.

Les mesures effectuées lors de la réalisation répondirent fort bien aux prévisions, ainsi qu'il est possible de le constater sur la Fig. 4 qui n'est que le relevé de la mise en tension d'une cerce quelconque. Le coefficient de frottement tel qu'il a pu être estimé d'après l'ensemble des résultats se situe entre 0,02 et 0,025, chiffres qui n'ont pas besoin d'être commentés.

Dans un domaine plus vaste, il est apparu nécessaire de contrôler la validité des prévisions avancées sur la tenue générale des ouvrages et leur limite de résistance.

Des maquettes, en plâtre principalement, furent essayées en laboratoire. L'étanchéité extérieure était constituée d'une vessie en caoutchouc et la précontrainte assez simplifiée. Les essais ont été poussés jusqu'à éclatement de la vessie par ouverture de fissures, ce qui était prévu. Puis, 3 maquettes au 1/10 ont été construites par le Service des Etudes et Recherches d'E.D.F. Destinées à destruction complète par essais de rupture à l'air, elles ont cherché longtemps, en raison du danger de projection de fragments pour le voisinage, des terrains accueillants. Finalement construites dans une galerie souterraine à Méry S/Oise, elles ont été essayées partiellement à l'eau, fin 1957.

Les observations faites, sur lesquelles nous ne nous étendrons pas, montraient le comportement parfaitement normal des modèles jusqu'à 30

kg/cm² environ. Au delà, comme prévu par le calcul, les fonds commen-
çaient à s'ouvrir; les pressions de destruction, par projection de fonds,
furent de 65 à 70 kg/cm²; un des modèles n'a pu en effet être poussé
jusqu'à rupture (Fig. 5).

L'échelle anormale, le nombre et le luxe de détails reproduits, faisaient
de ces ouvrages de véritables modèles réduits.

Avec le recul du temps, et l'expérience acquise, ces précautions peuvent
paraître superflues ou même inutiles, mais, la position avancée du projet
et l'absolue nécessité de réussir l'ouvrage puisque le programme français
de piles de puissance y était engagé, expliquent le luxe de précautions
déployées.

Sur le chantier, pendant ce temps, après l'installation des ateliers de
production et de manutention des câbles, un essai d'importance avait été
réalisé; il s'agissait simplement de pousser un câble d'essai jusqu'à rupture,
après s'en être servi de banc d'essai pour les opérations de mise en place,
bétonnage des têtes et mise en tension. On a pu déterminer quels étaient
les plus faibles des divers constituants d'un câble: fils, tête, contre-tête ou
calages. Avant rupture, obtenue à plus de 2 % d'allongement sous plus
de 2.200 tonnes par rupture des fils un peu partout le long du câble, des
auscultations extensométriques avaient permis de mesurer les contraintes
dans la tête. Aucun signe particulier de fatigue n'y a été décelé. L'ensemble
de ces observations a montré que la limite de résistance de l'ensemble était
bien celle des fils d'acier de précontrainte.

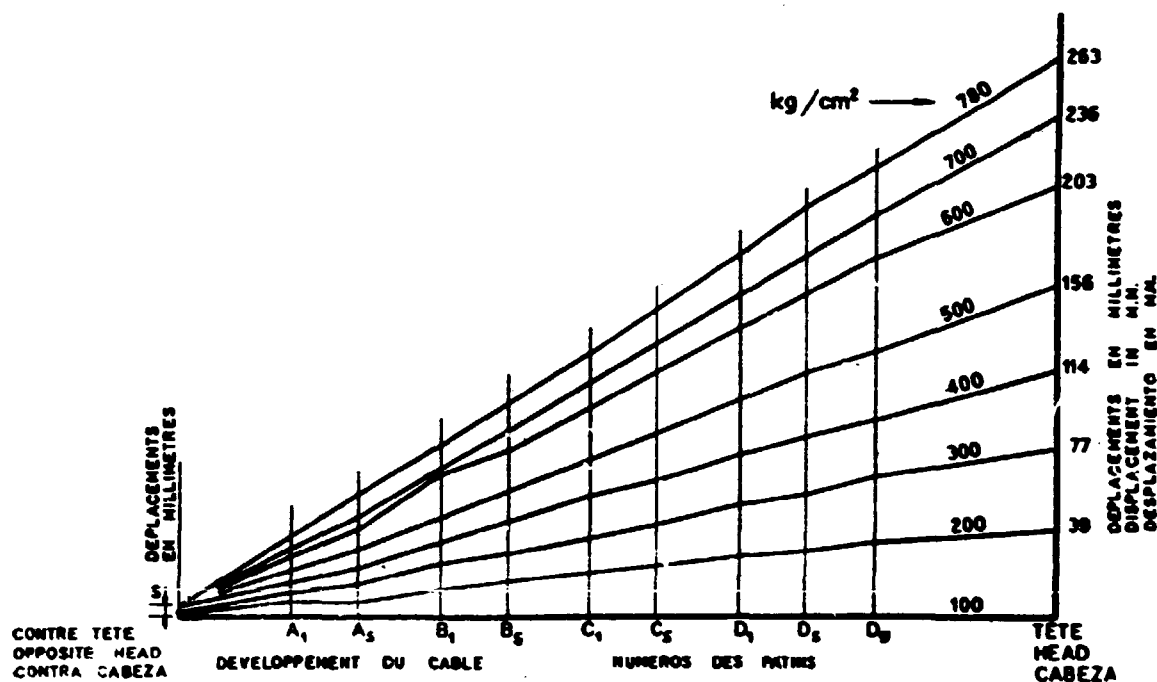


FIGURE 4

Graphique de mise en tension d'une cerce.
Déplacement des patins pour les différentes tensions.

Making up of the forwork.

Pan displacements for different tensions.

Puesta en tensión de una cercha.

Desplazamiento del patin para diferentes tensiones.

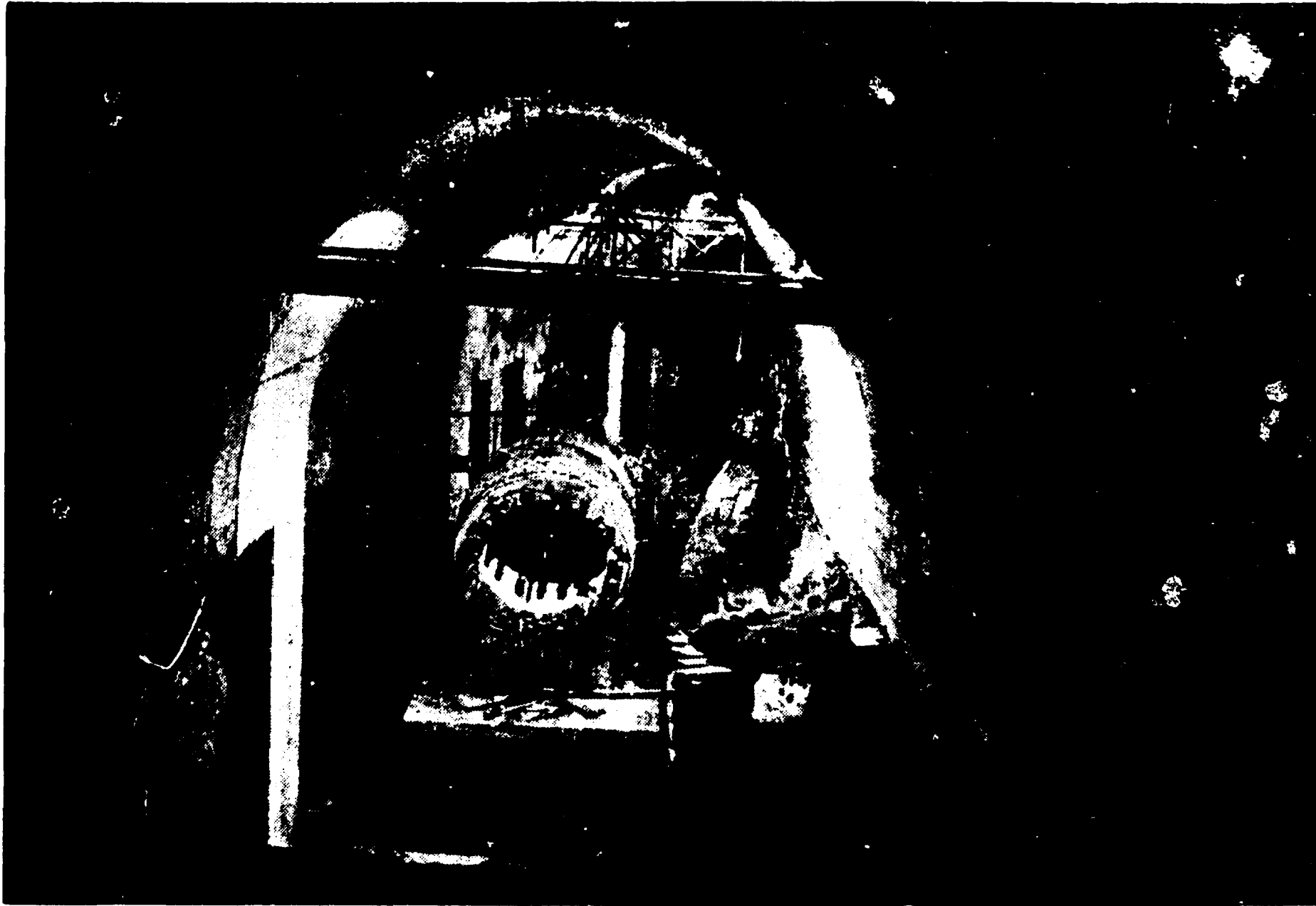


FIGURE 5

Vue générale de l'installation d'essai des modèles réduits.
General view of scale model testing installation.
Vista general de la instalación de ensayo para los modelos reducidos.

Vint le jour où les caissons furent achevés. L'un, celui de G2, fut équipé sans épreuve préalable, de tous ses organes intérieurs: poutres, protection thermique, graphite...

Pendant ce temps, on procédait à l'épreuve hydraulique de son frère, celui de G3, qui n'était donc à l'époque qu'une enveloppe de pression vide de tout matériel.

Commencée le 21 avril 1958, l'épreuve s'est terminée le 29 mai. En dehors des fuites diverses qu'il a fallu colmater spécialement sur les appareils annexes, tuyauteries d'amenée d'eau, de mesure de niveau, joints..., opérations de routine lors de la mise en eau d'une installation aussi vaste, le seul incident notable fut l'apparition d'une fuite sur la peau d'étanchéité. Après vidange partielle du caisson et introduction d'un canot pneumatique sur le plan d'eau intérieur, la vidange fut poursuivie jusqu'à découverte par ressuage de l'eau des fuites, d'une soudure défectueuse au droit d'une canalisation soudée sur la peau intérieure du caisson. Cette soudure reprise, l'épreuve fut poursuivie pour atteindre 31,2 kg/cm² le 22 mai 1958.

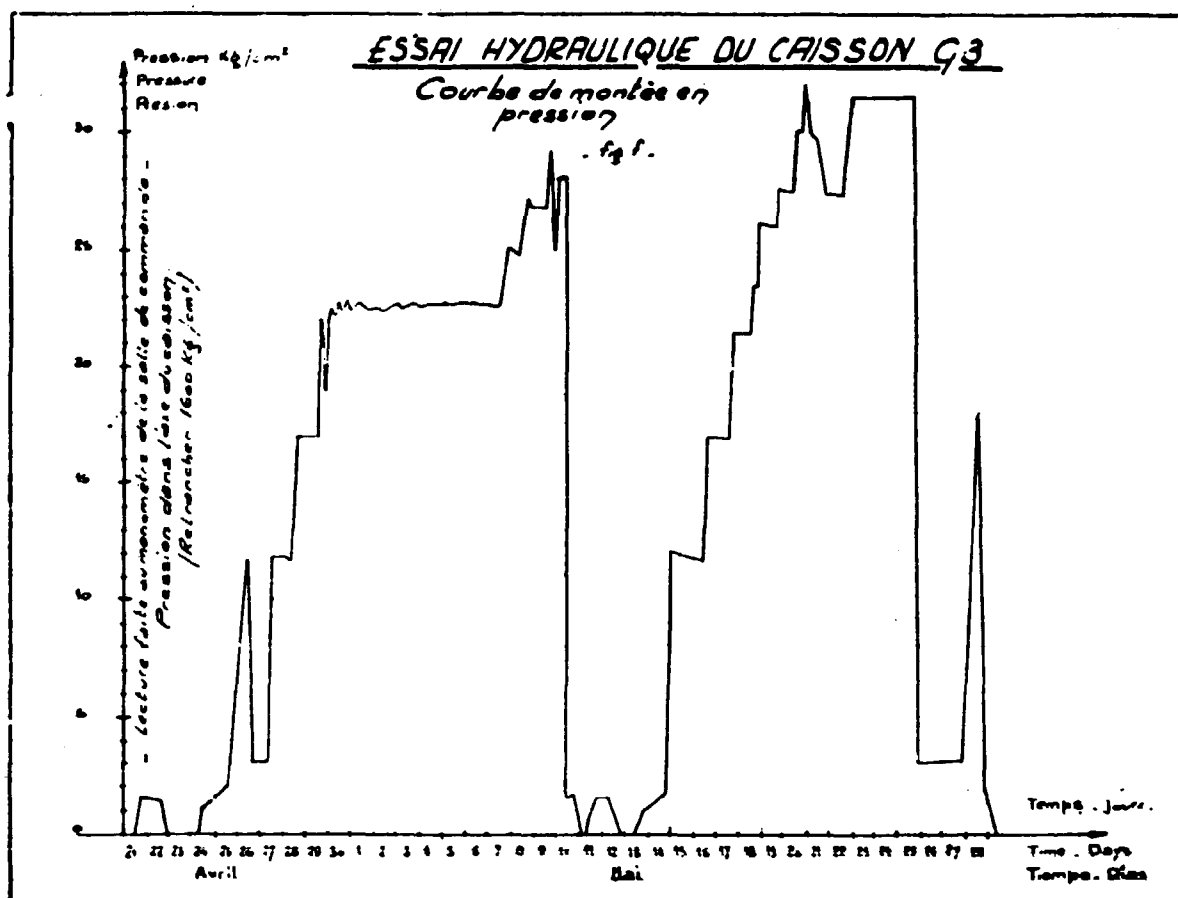


FIGURE 6

Epreuve hydraulique du caisson du réacteur G3.
Hydraulic test of reactor G3.
Ensayo hidráulico del reactor G3.

On voit sur la Fig. 6 la variation des pressions pendant la durée de l'épreuve. Pendant tout cet essai, les extensomètres noyés dans la masse

du béton ont permis de suivre la variation des contraintes d'ensemble et en particulier de vérifier son comportement élastique dans la marge 0-30 kg/cm².

Le 17 septembre 1958, le caisson de G2 pratiquement complètement équipé commença d'être essayé à l'air en même temps qu'une grande partie des tuyauteries de soufflage. Malgré le précédent de G3, des précautions sévères furent prises pour éviter la présence de personnel autour du caisson pendant les montées en pression. Pour atteindre 24 kg/cm² il fallait en effet pomper 120.000 m³ d'air environ et l'explosion, pour improbable qu'elle fut, ne serait pas passée inaperçue. C'est ainsi que les montées en pression avaient lieu la nuit, puis la pression descendue quelque peu avant accès à proximité du personnel nécessaire aux relevés. Cette épreuve fut vraiment sans histoire, si ce n'est, à 16 kg/cm² le départ inopiné à de grandes hauteurs d'un bouchon d'obturation provisoire d'un tube de barres de contrôle, accompagné d'une retombée à 0 de la pression dans le caisson.

Malgré cet incident, dix jours seulement furent nécessaires pour atteindre la pression d'épreuve de 24 kg/cm², absolus.

D'une manière générale, le recouplement des relevés d'un caisson à l'autre fut satisfaisant.

La Fig. 7 montre la variation de la pression pendant cet essai.

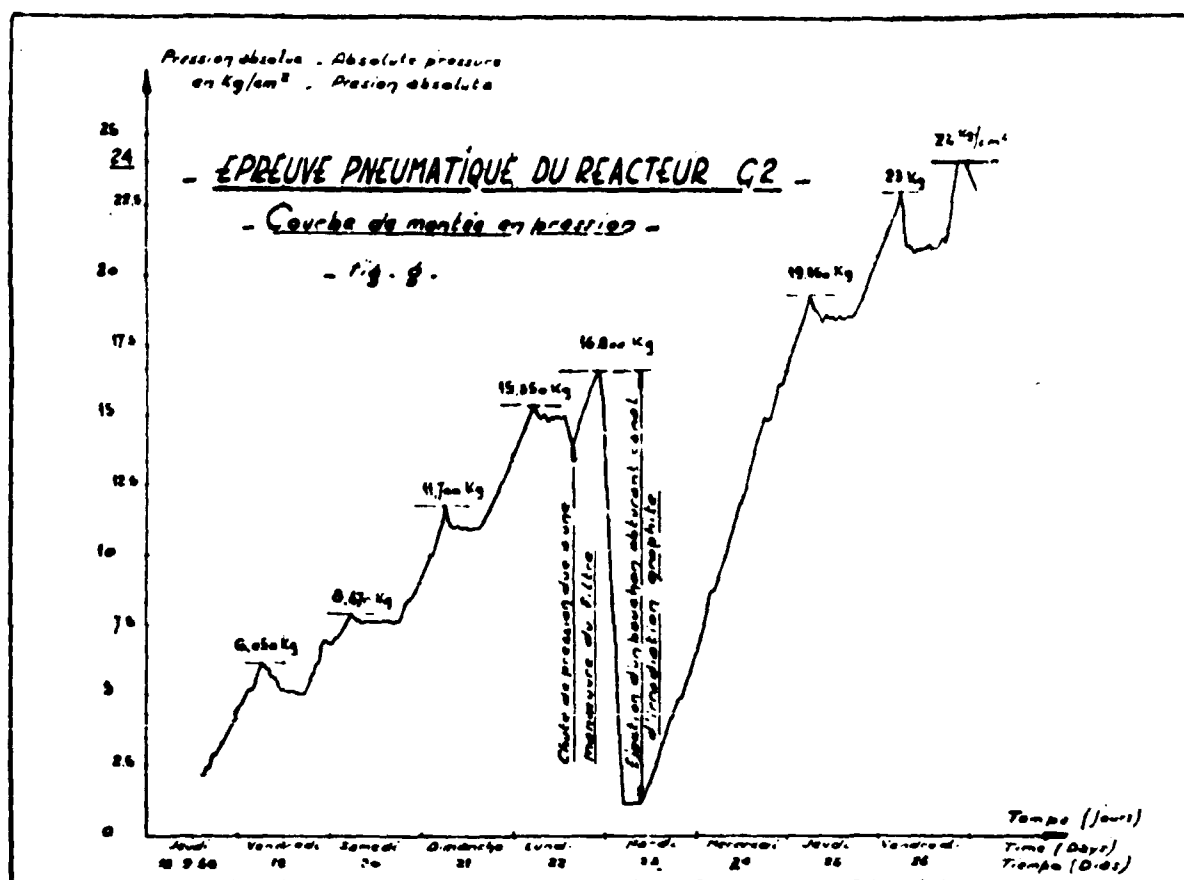


FIGURE 7

Epreuve pneumatique du caisson du réacteur G2.

Pneumatic test of reactor G2.

Ensayo neumático del reactor G2.

La pression mise à part, il fallait attendre la mise en service des réacteurs pour soumettre les caissons à d'autres épreuves.

Le remplissage en CO₂ laissait le béton parfaitement indifférent, isolé qu'il était par une peau en acier d'épaisseur considérable (30 mm) en regard des risques d'affaiblissement par corrosion.

Divers rayonnements, issus du coeur du réacteur en marche, atteignent bien le béton. Mais la présence d'un réflecteur de graphite épais (1 mètre) et surtout celle d'un bouclier d'acier de 120 mm accolé au graphite réduisent les flux à des valeurs faibles. Il a été impossible de se rendre compte jusqu'à présent d'un effet quelconque. Des essais sont entrepris pour évaluer les dommages causés à différents bétons par des rayonnements beaucoup plus intenses.

Le béton, avec ses 3 mètres d'épaisseur ne causa également aucun souci quant à l'efficacité de la protection qu'il assurait. C'est ainsi que l'intensité du rayonnement à sa surface extérieure était inférieure à 1/20 de dose pour une puissance de la pile de 200 MW thermiques. On pouvait accéder facilement, moyennant quelques précautions, dans les chambres de toboggan malgré la présence de trous importants (blocs tubulaires de déchargement) au travers de la paroi de béton. Aucune anomalie concernant la protection biologique ne fut constatée, même au droit des joints de dilatation au raccordement entre fonds et cylindres.

On attendait avec une certaine impatience les effets thermiques, car ainsi qu'on l'avait éprouvé sur G1, s'il est relativement facile de rester maître du refroidissement dans son ensemble, des effets secondaires et locaux viennent parfois détruire la belle harmonie du projet.

De ce fait, malgré la rapidité avec laquelle il a été possible de monter et de maintenir la pile au delà de sa puissance nominale de 200 MW, en trois points différents la température fatidique de 50° se trouva dépassée dans le béton. Il nous faut ici revenir un peu en arrière.

Il avait été admis au stade du projet que le béton ne chaufferait pas au delà de 50° C.

Cette donnée, acceptée par tous, était étayée par la présence d'un circuit de CO₂ froid qui doit balayer l'espace compris entre le coeur du réacteur et la paroi interne du béton.

De grandes précautions furent prises pour diminuer la transmission de chaleur du coeur vers le béton: isolement des appuis, pose d'un calorifuge (relatif) externe à la protection thermique, déflecteur, etc... Malgré tout, de grandes quantités de thermocouples avaient été disséminées, à priori, dans la masse du béton.

Ces précautions ne furent pas vaines, mais insuffisantes. On s'aperçut, tout d'abord, d'un échauffement au milieu du bloc tubulaire de chargement, au fur et à mesure du réglage des boisseaux. Il est traversé par les tubes qui véhiculent le CO₂ prélevé à la sortie des canaux pour détection de rupture de gaine.

Après tâtonnements, les causes du mal furent établies: circulation parasite du gaz chaud en l'absence de prélèvement; surestimation au départ de la capacité d'extraction de calories dans cette région par le CO₂ secondaire.

Quelques artifices permirent de maintenir assez aisément le phénomène

dans des limites acceptables en attendant les modifications de fond en cours de réalisation.

La deuxième alerte fut motivée par l'échauffement anormal du béton dans la partie haute du caisson, spécialement côté Sud. (Voir figure 3.)

Il apparut que la convection naturelle était à la base du phénomène et qu'elle était aidée dans ses effets par une lacune dans la répartition du flux de balayage froid.

La mise progressive en température de la région intéressée a permis, là encore, de limiter le phénomène à des valeurs acceptables.

Depuis, des essais systématiques entrepris sur G3 ont permis de dégager des remèdes. Profitant d'un dégonflage, les déflecteurs et diaphragmes nécessaires ont été montés dans le caisson de G2, malgré des conditions de travail exceptionnelles, en octobre dernier.

Enfin, un phénomène de thermosiphon apparut sur les faisceaux des tubes qui font communiquer les goulottes de déchargement avec les tobogans (voir Fig. 3).

Lui aussi est en relation avec les températures d'entrée des gaz primaires; cet effet a été combattu par l'installation de clapets anti-retour sur les tubes, à l'extérieur du caisson.

Dans ces trois incidents, des températures de l'ordre de 100° furent observées localement dans la masse du béton. Les extensomètres signalaient les contraintes parasites introduites dans le béton par les effets locaux de température.

Malgré ces températures très supérieures aux chiffres du projet et l'influence défavorable de leur localisation, à aucun moment, la résistance de l'ouvrage et particulièrement des câbles, n'a été compromise. En fait, on s'est borné à limiter provisoirement les performances de la pile, en attendant l'homogénéisation des températures, dès que des témoins sonores donnaient des signes de nervosité. Mais il est possible que des températures bien plus élevées ne soient traduites que par des fissurations sans grande importance.

En conclusion, nous pouvons dire que ces ouvrages ont donné entière satisfaction en ce qui concerne leur facilité de construction et leur résistance, à tel point qu'ils paraissent maintenant nettement sur-dimensionnés en égard à la pression de service.

Le caisson de G2 ayant fonctionné également sans dommage dans des conditions thermiques pour lesquelles il n'était pas fait, nous pensons qu'il est possible d'en améliorer graduellement les caractéristiques et les performances.

Il sera alors inévitable de comparer cette solution avec d'autres plus classiques toutes les fois que l'on se trouvera sur le chemin des grandes enveloppes sous forte pression.

9. La poursuite des essais de G2

Après une première période de fonctionnement, le réacteur G2 a été arrêté pour permettre de lui apporter certaines améliorations que cette première campagne avait suggérées.

Simultanément, de nombreux essais ont été effectués sur G3 en cours d'achèvement pendant le dernier semestre 1959 pour préciser divers points que la montée en puissance de G2 avait mis en évidence.

Résumé

Les premiers réacteurs industriels plutonigènes français G1 - G2 - G3 du Centre de Marcoule comportent une *installation de récupération d'énergie*.

La Production d'électricité de G1 ne compense pas l'énergie dépensée par ailleurs pour le fonctionnement de l'ensemble, par contre, G2 et G3 doivent fournir chacun une puissance de 25 à 30 MW au réseau national d'Electricité de France.

Cette puissance est modeste, mais l'expérience acquise grâce à ces Réacteurs est très grande et c'est grâce à elle qu'il nous sera possible de mettre en exploitation les réacteurs énergétiques EDF1 - EDF2 - EDF3.

Le mémoire décrit comment, avant tout démarrage du réacteur, les essais effectués, en particulier ceux concernant l'installation de récupération d'énergie et le caisson, ont permis d'abréger la phase de montée en puissance.

Summary

The first French plutonium-making reactors G1, G2 and G3 built at Marcoule research center are linked to a *power plant*.

The G1 electrical output does not offset the energy needed for operating this reactor. On the contrary, reactors G2 and G3 will each generate a net power of 25 to 30 MW, which will go into the E.D.F. grid.

This power is relatively small, but the information obtained from operation is great and will be helpful for starting up the power reactor E.D.F.1, E.D.F.2 and E.D.F.3.

The paper describes how, previous to any starting-up operation, the tests performed, especially those concerned with the power plant and the pressure vessel have helped to bring the commissioning date closer.

Resumen

Los primeros reactores industriales franceses, de plutonio, G1 - G2 y G3 del Centro de Marcoule, tienen una *instalación de recuperación de energía*.

La electricidad producida por G1, no compensa la energía gastada para el funcionamiento del conjunto; en cambio, G2 y G3 suministrarán, cada uno, una potencia de 25 a 30 MW a la red nacional de Electricidad de Francia.

Esta potencia es modesta, pero la experiencia adquirida con estos reactores es muy grande, y gracias a ella nos será posible poner en explotación los reactores de potencia E.D.F.1 - E.D.F.2 - E.D.F.3.

En esta memoria se describe cómo se ha logrado acortar la fase de puesta en carga del reactor, gracias a los ensayos efectuados, antes de su funcionamiento, y en particular a los correspondientes a la instalación de recuperación de energía y de la cámara a presión.

Manuscrit reçu le 5 juillet 1960

FIN