

CEA 2258 - CONTE F.

**EXPERIENCE D'EXPLOITATION DES REACTEURS DE MARCOULE  
(1963)**

**Sommaire.** - Les résultats atteints après trois ans de fonctionnement des réacteurs G 2/G 3 permettent une accumulation considérable de l'expérience d'exploitation de ces réacteurs.

Les principales originalités :

- caisson en béton précontraint
- chargement en marche
- surveillance automatique des températures

sont largement justifiées par l'exploitation actuelle.

L'auteur confirme l'intérêt de ces solutions d'avant-garde et en tire des conclusions pour les études de futures centrales nucléaires.

CEA 2258 - CONTE F.

**OPERATIONAL EXPERIENCE OF THE MARCOULE REACTORS (1963)**

**Summary.** - The results obtaining from three years operation of the reactors G 2, G 3 have made it possible to accumulate a considerable amount of operational experience of these reactors.

The main original points :

- the pre-stressed concrete casing
- the possibility of loading while under power
- automatic temperature control

have been perfectly justified by the results of operation.

The author confirms the importance of these original solutions and draws conclusions concerning the study of future nuclear power stations.



**PREMIER MINISTRE  
COMMISSARIAT A  
L'ÉNERGIE ATOMIQUE**

**EXPERIENCE D'EXPLOITATION  
DES REACTEURS DE MARCOULE**

par

**F. CONTE**

**Rapport C.E.A. n°2258**

**1963**

**CENTRE DE PRODUCTION  
DE PLUTONIUM DE MARCOULE**



- Rapport C.E.A. n° 2258 -

CENTRE DE MARCOULE

EXPERIENCE D'EXPLOITATION DES REACTEURS DE MARCOULE

par

F. CONTE

- 1963 -



## **S O M M A I R E**

- I - INTRODUCTION**
  - II - SECURITE DES CAISSONS EN BETON PRECONTRAIT**
  - III - ENTRETIEN ET SURVEILLANCE DES CABLES DE PRECONTRAINT**
  - IV - INCIDENTS ET AMELIORATIONS DES APPAREILS DE CHARGEMENT**
  - V - INCIDENTS ET AMELIORATIONS DES SALLES DE DECHARGEMENT**
  - VI - PERFORMANCES POSSIBLES DE L'INSTALLATION DE CHARGEMENT**
  - VII - FLUCTUATION DE LA PUISSANCE PENDANT LE CHARGEMENT**
  - VIII- QUELQUES INTERVENTIONS SPECIALES**
  - IX - FONCTIONNEMENT DE LA DETECTION DE RUPTURE DES GAINES**
  - X - SURVEILLANCE DES TEMPERATURES CANAUX**
  - XI - ANOMALIES DE TEMPERATURES DANS LE CAISSON**
  - XII - INSTALLATIONS CLASSIQUES**
  - XIII- CONCLUSION**
- ADDITIF CONCERNANT QUELQUES POINTS PARTICULIERS**





## **EXPERIENCE D'EXPLOITATION DES REACTEURS DE MARCOULE**

### **R E S U M E**

**Les résultats atteints après trois ans de fonctionnement des réacteurs G 2 - G 3, permettent une accumulation considérable de l'expérience d'exploitation de ces réacteurs.**

**Les principales originalités :**

- caisson en béton précontraint**
- chargement en marche**
- surveillance automatique des températures sont largement justifiées par l'exploitation actuelle.**

**L'auteur confirme l'intérêt de ces solutions d'avant-garde et en tire des conclusions pour les études de futures centrales nucléaires.**

## I - INTRODUCTION

Les réacteurs G 2 et G 3 du Centre de Marcoule sont du type Uranium naturel-graphite-gaz. Leur puissance nominale est de 200 MW. Une centrale de récupération leur est associée et débite sur le réseau français.

Ces piles sont horizontales, elles possèdent 1 200 canaux chargés de 120 t d'Uranium naturel, la pression de service est de  $15 \text{ kg/cm}^2$ , le soufflage est assuré par des turbosoufflantes.

Certaines originalités de ces réacteurs doivent être rappelées :

- les caissons sont en béton précontraint
- le chargement s'effectue réacteur en marche
- la surveillance des températures et des Ruptures de Gaines est automatique et le contrôle est très centralisé.

La montée en puissance de G 2 a eu lieu en Avril 1959, celle de G 3 en Mars 1960. Il y a donc respectivement 3 ans 1/2 et 2 ans 1/2 que fonctionnent ces réacteurs. Les résultats obtenus sont très satisfaisants, la puissance courante de fonctionnement dépasse de 20 p. 100 la puissance nominale.

Il paraît intéressant de passer en revue la somme d'expérience acquise dans ce qu'elle peut avoir de profitable pour les centrales futures. Cette communication fera état de l'exploitation du réacteur proprement dit en omettant le côté physique du problème, traité en détail au symposium de Bornemouth en Avril 1962. Le présent mémoire s'attache principalement à l'expérience tirée des originalités citées ci-dessus, expérience particulièrement intéressante, car ces originalités d'aujourd'hui sont en fait des avant-premières.

Il est en effet remarquable de constater que le béton précontraint paraît rallier de plus en plus les suffrages des projeteurs de centrales nucléaires. Il est évident que l'arrêt d'un réacteur pour effectuer le chargement du combustible sera bientôt considéré comme une technique dépassée. L'automatisation, quant à elle poursuivra la conquête complète de nos techniques.

L'adoption à Marcoule de ces solutions d'avant-garde permet de faire le point après quelques années d'exploitation et nous espérons que le profit que nous en avons déjà tiré pourra être largement généralisé dans les 10 prochaines années.

## II - SECURITE DES CAISSONS EN BETON PRECONTRAIT

Le colloque du mois de Mai à Vienne sur la Sécurité des Réacteurs a mis en lumière la confiance de la plupart des constructeurs dans le béton précontraint pour les caissons de réacteurs. Par ailleurs, de nombreuses réalisations en cours ou en projet confirment cette confiance. Il appartient à l'exploitant des piles de Marcoule, les premières réalisées et les seules en fonctionnement à l'heure actuelle suivant cette technique, de donner son opinion sur un sujet aussi important. Disons tout de suite que cette opinion est très favorable et que notre conviction est

acquise depuis les premiers jours.

Il est évident que le béton précontraint est la voie à suivre pour les réacteurs de puissance à construire dans le proche avenir. Cette technique permet de concevoir des caissons de grandes dimensions, à des pressions élevées, en conservant un facteur de sécurité tel qu'en connaissent peu de réalisations. Je rappellerai que les caissons de G 2 et G 3 ont un diamètre de 20 m, une longueur de 34 m, une épaisseur de 3 m. Les 3 modèles au 1/10<sup>e</sup> réalisés dans des conditions de similitudes scrupuleuses ont explosé à des pressions supérieures à 60 kg/cm<sup>2</sup> soit 4 fois la pression de service. Les caissons eux-mêmes ont été éprouvés hydrauliquement à 30 kg/cm<sup>2</sup> soit 2 fois la pression de service.

La construction a été simple et rapide, la pose et la mise en tension des câbles n'ont soulevé aucun problème particulier. L'entretien et la surveillance de cette réalisation sont évoqués plus loin, mais les ennuis mineurs qui sont apparus n'ont jamais affecté la sécurité ni entamé notre confiance.

Les études effectuées à cette occasion ont montré que dans le cas d'un accident maximum envisageable sur les circuits de refroidissement, le caisson pourrait être remis en service après un échauffement pouvant aller jusqu'à 200° et une fissuration importante corrélative à cet échauffement. Encore faut-il noter que les contraintes dans ce cas extrême sont considérablement exagérées du fait du gradient de température important dans la masse du béton, l'échauffement local étant supposé très rapide. Il apparaît que le béton peut supporter aisément et normalement des températures élevées à condition que l'échauffement et le refroidissement soient lents et contrôlés. Une autre solution pour éviter ces contraintes peut être le cloisonnement volontaire des différentes zones du béton travaillant ainsi séparément.

En conclusion, je ne pourrai ici que confirmer l'intérêt considérable de cette technique, ce dont tout le monde paraît convaincu, mais il convenait que j'y apporte mon témoignage.

### III - ENTRETIEN ET SURVEILLANCE DES CABLES DE PRECONTRAINTTE

Les caissons en béton des réacteurs G 2 - G 3 sont cylindriques et horizontaux. La précontrainte est appliquée à ce béton par 3 groupes principaux de câbles au nombre de 158. Ces câbles constitués par un ensemble de 700 à 800 fils de 5 mm sont disposés soit à l'extérieur du caisson soit à l'intérieur dans des gaines spéciales non étanches. Il convient donc de remarquer qu'ils sont en contact permanent avec l'atmosphère, la partie extérieure étant visible, la partie contenue dans les gaines échappant à tout contrôle visuel.

Initialement, la protection de ces câbles était assurée par un revêtement d'enduit spécial imperméable dans les parties visibles. Ailleurs les câbles sont simplement graissés avant l'introduction dans les gaines. Aucune précaution supplémentaire n'avait été envisagée. Seules les gaines comportaient un système simple de tuyauterie permettant l'insufflation d'air. Périodiquement, une remise sur vérins permettait de suivre l'évolution des tensions des câbles en fonction du temps, des pressions et des températures du béton. Les vérifications ont toujours

confirmé les valeurs prévues par le projeteur, en particulier en ce qui concerne la relaxation des câbles et le fluage du béton.

Trois ans environ, après la mise en service de l'installation, à l'occasion d'une de ces vérifications, un câble a présenté une perte de tension supérieure à la normale. L'enlèvement de câble a été effectué aussitôt sans perturber le fonctionnement du réacteur. Une corrosion importante avait détérioré la plupart des fils et certains étaient rompus. Vérification faite, cette corrosion provenait de différents agents liquides qui s'étaient introduits dans la gaine pendant la construction, ce câble ayant été le premier mis en place à titre d'essai et ensuite laissé en place sans surveillance spéciale.

Par la suite, deux autres câbles accusèrent aussi une légère baisse de tension anormale et furent changés. Nous nous sommes trouvés alors devant un phénomène de corrosion sous tension particulièrement net, avec rupture des fils devenus cassants, et amorce de corrosion en forme de lunule suivant des plans perpendiculaires aux fils. Ici aussi, cette corrosion s'était produite en présence de forte humidité et même d'eau stagnant dans les gaines. Le problème de la protection de ces câbles se posait donc et une solution moins simpliste devait être mise en oeuvre.

Il est à remarquer que seuls les câbles non visitables et contenus dans des gaines sans circulation d'air ont été affectés. Les câbles extérieurs sont toujours restés en parfait état et leur tension conservée à la valeur initiale.

Un système de soufflage d'air sec a été mis rapidement en oeuvre, et par l'intermédiaire des tuyauteries placées initialement, chaque gaine a été d'abord séchée puis maintenue sèche en permanence. Des prélèvements réguliers de l'air évacué décèlent toute élévation anormale du degré hygrométrique. Celui-ci a été fixé à 30 p. 100 maximum, valeur aisément maintenue.

Par ailleurs, il paraissait nécessaire de contrôler la tension de l'ensemble des câbles de façon fréquente. La méthode habituelle de remise sur vérin est longue et de surcroît impose à chaque opération un petit supplément de tension pour le décollage des cales. Une cale dynamométrique spéciale a été fabriquée et chaque tête de câble en est équipée. Chaque cale renferme des témoins sonores à corde vibrante qui sont reliés à un poste central. L'auscultation de ces cales peut être faite rapidement et aussi fréquemment qu'il est nécessaire. La tension de chaque câble est ainsi connue en permanence.

En conclusion, il faut remarquer que le phénomène de corrosion a pu se manifester en premier lieu à cause d'un manque de surveillance et en deuxième lieu en raison de la présence d'humidité, présence rendue possible par le principe même de ces câbles non revêtus et maintenus au contact de l'air. Mais par ailleurs, la détection des anomalies, les modifications, la surveillance et le remplacement sans histoire des câbles ont aussi été possibles en raison de ce même principe. La question peut donc se poser de savoir si de tels phénomènes apparaîtraient sur des câbles injectés par exemple. Il semble que non. Mais dans ce cas, surveillance et remplacement seraient également impossibles. Il est à remarquer que le remplissage des gaines par un agent neutre quelconque mais gazeux ou liquide donne les mêmes possibilités que la solution adoptée à Marcoule.

Deux écoles peuvent donc s'affronter ici : conserver une possibilité de corrosion mais le savoir et y remédier, ou supprimer dans le principe la raison de cette corrosion mais ne pas savoir sûrement si elle existe et ne pouvoir intervenir.

#### IV - INCIDENTS ET AMELIORATIONS DES APPAREILS DE CHARGEMENT

Le chargement des réacteurs de Marcoule se fait en marche, c'est-à-dire, que ces opérations effectuées en service continu n'affectent pas le fonctionnement de la pile elle-même. Rappelons-en brièvement les principes généraux : G 2 et G 3 sont des piles horizontales, l'introduction du combustible neuf a lieu par la face extérieure où débouchent les 1 200 canaux sur lesquels vient se fixer l'appareil de chargement. Le combustible introduit pousse les cartouches du canal et provoque à l'autre extrémité la chute du combustible irradié. Celui-ci descend de lui-même par gravité jusqu'aux installations de mise en container et est ensuite dirigé vers la piscine de stockage. L'ensemble de ces opérations est automatique ou télécommandé.

Le chargement proprement dit s'effectue par l'intermédiaire de 2 sas de chargement. Un sas étant accouplé au canal à charger, les pressions sont égalisées, le bouchon est déverrouillé et retiré du réacteur. On dispose alors le combustible neuf devant ce même bouchon qui est remis en place dans le canal entraînant les cartouches dans son mouvement. La position du bouchon et du combustible est connue en permanence, un mobile extérieur simulant le mouvement. Quelques incidents répétés lors de la remise en place et du verrouillage du bouchon nous ont imposé une révision du système dont nous avons dû accroître la précision. La tolérance adoptée actuellement et qui donne satisfaction est inférieure au millimètre pour la détection du déplacement du bouchon.

Des ruptures d'étanchéité se sont produites sur les joints du sas de chargement. Celui-ci s'étant décomprimé, le bouchon a été repoussé dans l'appareil par la pression de  $\text{CO}_2$  du réacteur. Les dégâts à l'appareillage ont chaque fois été assez importants.

Le système de mise en mouvement du bouchon a été entièrement remanié de façon à devenir irréversible et à pouvoir contenir des poussées importantes. Une rupture d'étanchéité dans l'état actuel provoquerait une perte momentanée de  $\text{CO}_2$  à l'atmosphère, mais l'appareillage ne souffrant plus et étant toujours disponible, il serait possible de refermer le canal immédiatement.

Des difficultés ont été rencontrées à différentes reprises pour la remise en place définitive de bouchons et surtout pour leur verrouillage sur le canal. Nous avons été dans l'obligation, lors d'un de ces incidents, de découper au chalumeau l'avant du sas de chargement pour l'abandonner sur la pile. Cette opération nous a montré la modification à apporter à l'appareil. Actuellement, le sas possède une partie avant démontable, qu'il est possible d'abandonner sans ennui sur un canal rétif. Quelques opérations simples permettent ensuite de le récupérer puisqu'il devient accessible, la partie gênante de l'appareil étant reculée.

Pour renfermer malgré tout un canal, une autre possibilité nous est aussi donnée par un bouchon spécial en permanence dans le sas de chargement. Ce bouchon à verrouillage automatique a la longueur de deux cartouches et occupe un alvéole réservé au combustible. En cas d'ennuis, il suffit de pousser ce bouchon comme une cartouche ordinaire et il vient se verrouiller de lui-même sur le canal, en assurant la fermeture.

Les serrures de bouchons des canaux de G 2 et G 3 étaient à l'origine les mêmes que ceux de la pile G 1 qui travaille sans pression. Là aussi, quelques ennuis et surtout quelques craintes nous ont fait décider leur remplacement. Verrouillage, avance et recul faisaient travailler les mêmes pièces et provoquaient une usure prématurée. Ces fonctions ont été séparées et les sécurités accrues.

L'entretien et le réglage des appareils de chargement, habituellement effectués sur place, gênaient et ralentissaient la cadence des opérations. Une possibilité d'enlèvement de l'appareil complet a été aménagé, son remplacement devenant ainsi très rapide. L'appareil évacué peut être installé sur un canal expérimental reproduisant fidèlement la géométrie du coeur du réacteur.

Les réglages effectués systématiquement à l'aide de calibres simples permettent une remise en service immédiate, sans mise au point ni tâtonnements supplémentaires.

En conclusion, quelques principes se dégagent des incidents que nous avons eus à subir, qu'il n'est pas possible de citer tous ici, et des modifications qui ont permis de les éliminer :

- Pouvoir toujours refermer un canal ouvert et ce, par plusieurs moyens différents
- Pouvoir toujours abandonner un canal à n'importe quel moment et poursuivre ainsi les opérations ailleurs
- Supprimer toutes causes d'incertitude, grâce à une précision mécanique très poussée
- Disposer de commandes positives et irréversibles dans tous les sens et ne pas se fier aux ressorts ou autres retours automatiques
- Séparer les fonctions dans les commandes mécaniques
- Prévoir un entretien et un réglage systématique simple mais efficace

Signalons par ailleurs, et à titre d'information, de nouveaux moyens mis en oeuvre, pour essais, pour le déchargement et le chargement de ces réacteurs par la face avant. Un ringard souple et enroulable constitué de feuillard de tôle s'agrafant automatiquement, pénètre dans le coeur. Ce ringard, muni d'une pince électrique à son extrémité, peut ainsi retirer les cartouches une à une, les transférer dans d'autres canaux ou les évacuer par cercueils spéciaux. Il y a aussi possibilité, par simple poussée de ce ringard, de déchargement par la voie normale sans être tenu de remplacer le combustible comme dans le cas habituel et ainsi d'obtenir aisément des canaux vides. Le système complet est contenu dans une petite enceinte sous pression de faible encombrement. La longueur totale de ringard qui peut être déployée atteint 30 mètres.

## V - INCIDENTS ET AMELIORATIONS DES SALLES DE DECHARGEMENT

Le combustible irradié tombe par gravité hors du réacteur et est récupéré, toujours sous pression, dans des couloirs vibrants horizontaux qui permettent de le stocker et de le refroidir pendant quelques instants avant la mise à l'air libre. Le passage du  $\text{CO}_2$  à  $15 \text{ kg/cm}^2$  à l'air à pression atmosphérique s'opère dans un sas équipé d'un couloir vibrant qui évacue les cartouches par groupe de 4. Ces 4 cartouches sont disposées dans un tube d'aluminium (container) qui est rétreint à ses extrémités et soudé. Le container est ensuite déposé dans une conduite hydraulique qui l'achemine en sous-sol jusqu'à la piscine de désactivation où le combustible est stocké.

L'ensemble de ces opérations est automatique et cet automatisme ne nous a jamais créé d'ennuis. Les quelques incidents que nous ayons eus à déplorer proviennent de coincements mécaniques des containers dans les machines. Un remodelage des pièces de guidage est venu à bout de la majorité des cas.

Comme dans le cas du chargement, une chaîne d'essai extérieure a été réalisée. Les machines de mise en containers sont périodiquement évacuées, entretenues et réglées. Leur interchangeabilité devient complète. Un entretien systématique a ainsi remplacé le dépannage qui est le propre de toute installation prototype.

Lors de l'introduction par vibration des cartouches dans le container, certaines refusaient d'entrer. Un tube spécial permet d'accéder au chemin suivi par le combustible et de le pousser ou de le retirer mécaniquement.

Les systèmes à vibrations enfermés dans des enceintes étanches et sous pression nous ont occasionné quelques déboires. La seule parade efficace a été une précision accrue et un contrôle strict et systématique de l'installation.

Tous les autres incidents ont été surmontés facilement en accroissant les moyens de contrôle visuel et les moyens d'intervention à distance. Les machines et le combustible étant ici à l'air libre, il a suffi de disposer de hublots à grande visibilité et de mettre en oeuvre des télémanipulateurs de grande capacité.

## VI - PERFORMANCES POSSIBLES DE L'INSTALLATION DE CHARGEMENT

Les chapitres précédents font état de modifications dans la mécanique et la géométrie des installations de chargement avec comme but principal un accroissement de la sécurité. Un deuxième but était atteint par la même occasion, il s'agit de la rapidité des opérations.

Par ailleurs, des améliorations supplémentaires ont été apportées afin de concourir cette fois au seul impératif des performances.

Les sas de chargement sont mis en pression ou en dépression à chaque opération. Il avait été prévu un circuit complexe de mise en pression et de mise sous vide de l'appareil. Ces opérations étaient fort longues. Le circuit a été modifié, la compression est faite à partir de

gaz neuf, la mise sous vide (pour éviter des entrées d'air en pile) est remplacée par un balayage. Le gain de temps a été considérable. De plus, l'ancien circuit était à commande automatique. Ces opérations ne faisant prendre aucun risque particulier et restant très simples sont maintenant manuelles et ont permis de simplifier l'installation.

L'appareil de chargement positionne à chaque manoeuvre du bouchon 2 cartouches. Après quelques mois d'exploitation il a paru possible d'introduire un nombre supérieur de cartouches sans inconvénient pour les températures ou les débits à l'intérieur du canal. Le fonctionnement actuel normal admet 4 cartouches à chaque manoeuvre de bouchon, permettant une meilleure cadence.

L'installation actuelle de chargement en marche des réacteurs G 2 - G 3 permet de renouveler, en toute tranquillité, la totalité du combustible en 2 mois, le réacteur fonctionnant normalement.

Il convient de mentionner un autre aspect des performances du chargement en marche de ces réacteurs, il s'agit de l'homogénéité de l'irradiation. La circulation du combustible dans les canaux permet, suivant le nombre de cartouches chargées et déchargées, une économie certaine de combustible. Ceci peut provenir d'une plus grande homogénéité dans l'irradiation imposée, ou de la possibilité d'irradier au maximum un plus grand nombre de cartouches. Cet avantage supplémentaire, d'un grand intérêt, découle en partie de la position horizontale des canaux des réacteurs G 2 - G 3.

## VII - FLUCTUATION DE LA PUISSANCE PENDANT LE CHARGEMENT

Le chargement en marche de nos réacteurs a deux conséquences au point de vue puissance :

- La première, d'effet immédiat, provenant du mouvement du combustible ou des absorbants.

Le gaz de refroidissement tend à repousser les cartouches vers la face de chargement quand le bouchon étant reculé ne les maintient plus en place. Ceci provoque peu d'effet quand il s'agit de combustible, mais provoque des fluctuations de puissance plus importantes quand on charge ou décharge des absorbants. Dans ce cas les variations peuvent atteindre, si l'on n'y remédie par les barres de contrôle,  $\pm 10$  MW autour de la puissance normale. En fait, le contrôle suit aisément ces fluctuations et, dans le cas d'absorbant, les manoeuvres sont faites assez lentement pour ne pas créer de cyclages du combustible.

- La deuxième conséquence, d'intérêt considérable, est la possibilité d'adapter les zones d'irradiations différentes aux zones de températures ou de flux différentes et ainsi de profiter d'un gain de puissance supplémentaire au prix d'une programmation des chargements très étudiée. De plus, l'irradiation générale de la pile peut ne pas influencer sensiblement sur le contrôle du réacteur, l'introduction ou l'enlèvement d'absorbant étant possible à tout instant.



## VIII - QUELQUES INTERVENTIONS SPECIALES

Le début de l'exploitation des réacteurs G 2 et surtout G 3 a été quelque peu assombri par des incidents survenus pendant le déchargement en marche du combustible irradié. Ce combustible avait tendance à s'arrêter et à se coincer au bout des canaux de l'empilement à l'endroit où normalement il doit tomber dans des goulottes inclinées et descendre par gravité hors du caisson comme il a été expliqué précédemment.

La raison de ces incidents répétés provenait d'une déformation du combustible en pile rendant difficile la sortie des cartouches en bout de canal. Signalons que ces déformations concernaient uniquement la première livraison et que par la suite un traitement approprié de l'Uranium a supprimé ces défauts.

La première campagne de déchargement s'est donc terminée par un arrêt des réacteurs et un dégonflage permettant une intervention sur ces canaux afin de les dégager. Il convient de se représenter comment sont disposés les goulottes et les canaux à l'endroit de ces coincements. Les goulottes sont des tubes aplatis inclinés à 45° de façon à desservir des rangées de canaux suivant une diagonale. Ces tubes, étant pour ainsi dire empilés les uns sur les autres et reliés aux canaux eux-mêmes par des pièces métalliques plus ou moins compliquées, permettant le passage des cartouches de 30 cm de long qui doivent ainsi changer de direction suivant un angle de 90° et descendre ensuite seules dans les goulottes, maintenues dans la bonne direction par des plaques de tôle (déflecteurs) disposées en face de chaque canal. Deux accès possibles pour les interventions : d'une part à travers le canal proprement dit soit à 20 m de la face chargement, d'autre part en remontant le long des goulottes depuis l'extérieur du caisson, soit à 15 m environ, à travers des obstacles divers et évidemment par des tubes courbes de petit diamètre.

Il a fallu des prodiges d'imagination pour construire des appareils spéciaux permettant de décoincer et d'évacuer les cartouches. Ensuite, d'autres appareils furent nécessaires pour redresser les tôles malmenées par l'acharnement du personnel. Des caméras de télévision spéciales de petit format ont été employées et modifiées sans cesse pour chaque opération. Mais aucune description ne peut reproduire ce que furent les difficultés de l'opération menée dans des délais que l'on n'osait espérer.

Notre propos n'est pas ici de mettre l'accent sur des moments difficiles comme chacun a pu en connaître dans son domaine. Mais à la lumière de cette expérience, nous aimerions énoncer quelques principes que nous observerions si nous avions à établir un nouveau projet d'installation de déchargement en marche d'un réacteur.

Nous ferions en sorte que toutes les parties du réacteur soient visitables facilement par caméra de télévision ou système optique.

Nous nous rappellerions journallement que la ligne droite est non seulement le plus court chemin mais aussi le plus aisé.

Nous étudierions pendant le projet tous accessoires permettant de "travailler" à tout endroit du réacteur.

Ce qui nous amènerait à remodifier le projet dans le sens de la simplification.

## IX - FONCTIONNEMENT DE LA DETECTION DE RUPTURE DES GAINES

Le réacteur G 2 a été équipé, pour des raisons de planning, d'une installation de Détection de Rupture de Gaines semblable à celle des réacteurs de Calder Hall.

Le réacteur G 3 par contre a reçu une installation étudiée par les services du Commissariat à l'Energie Atomique, d'un type résolument différent. Si les produits de fission collectés sont toujours les mêmes (Rubidium et Cesium) les dispositifs pneumatiques mécaniques et électriques dérivent en partie de l'expérience déjà acquise sur le réacteur G 1. En particulier le système de prélèvement est équipé d'électrovannes rendant possible un automatisme poussé et rapide. Le traitement des informations délivrées par les détecteurs est effectué électroniquement et les ordres de modification des circuits sont envoyés instantanément aux électrovannes.

De plus, une mise en mémoire du bruit de fond des canaux s'effectue également sur programme automatique à commande électronique. La détection est ainsi indépendante d'une contamination possible, seuls apparaissant les signaux provenant d'une évolution. La valeur de cette évolution est constamment recalée grâce à un détecteur d'azote 16 qui pilote l'ensemble des détecteurs et permet ainsi de s'affranchir des variations de puissance du réacteur.

Dès la mise en exploitation de G 3 cette Détection de Rupture de Gaines s'est révélée sensible, fidèle et rapide. Peu de temps a été nécessaire pour la mise au point des ensembles pneumatiques, les plus délicats en raison du grand nombre d'électrovannes.

Sans doute, en raison de cette rapide mise au point, les exploitants sont devenus vite très difficiles et ont demandé des performances accrues à l'installation.

Les modifications apportées ici n'ont pas eu pour cause les incidents habituels mais plutôt l'ambition technique d'électroniciens et d'électriciens toujours insatisfaits.

En particulier, l'automatisme, déjà très poussé, a été généralisé.

Dans l'état actuel, le travail de l'exploitant se résume à un entretien et une révision systématique, toutes les séquences étant devenues automatiques. Dès qu'un groupe de canaux (5 canaux par groupe) voit son signal de détection augmenter, ce groupe est dirigé vers une chaîne spéciale qui compte à son tour chaque canal un par un et discrimine ainsi le canal fautif. Si ce signal atteint le maximum de l'échelle, la sensibilité est modifiée de façon à suivre l'évolution en permanence.

Ainsi, et grâce à cet automatisme, un canal contenant une cartouche douteuse peut être déterminé en 1 minute dans le cas favorable et en 5 minutes dans le cas défavorable dès que la détection a révélé une augmentation des signaux du groupe. Chaque groupe étant balayé toutes les 20 minutes on conçoit l'importance du gain d'une dizaine de minutes rendu ainsi possible.

La Détection de Rupture de Gaines est une des parties du contrôle d'un réacteur où l'électronique a pu trouver un terrain à sa mesure et donner des résultats brillants.

L'énorme gain de temps ainsi réalisé sur G 3 grâce à cette automatisation serait particulièrement mis en valeur par une détection primaire plus rapide. Il n'est pas possible sans modification très importante de nos réacteurs d'augmenter la cadence de cette détection qui est de 20 minutes pour un cycle complet.

Mais certaines réalisations en cours en France ayant semble-t'il résolu ce problème d'élégante façon, on doit pouvoir espérer que les futures installations de Détection de Rupture de Gaines permettront d'isoler et de suivre toute fuite dans l'élément combustible avec la rapidité que réclame un bon contrôle de réacteur.

## X - SURVEILLANCE DES TEMPERATURES CANAUX

Dès l'époque du projet G 2 - G 3, il avait été convenu que la mesure des températures de gaines ne serait pas un élément du contrôle direct du réacteur. En effet, la mise en place de thermocouples et de câblages n'était pas compatible avec un déchargement permanent en marche.

Par contre, chaque sortie de gaz des canaux est équipée d'un thermocouple. Initialement, ces températures devaient être vérifiées par contrôle manuel à intervalles réguliers. Quelques canaux choisis étant reportés sur des enregistreurs en salle de commande et suivis en permanence, leurs valeurs entrant dans les éléments habituels du contrôle.

Depuis la mise en route de G 2 et G 3 les choses ont bien changé et la mesure de températures canaux est maintenant une des installations les plus importantes au point de vue sécurité et la plus intéressante au point de vue contrôle. Deux parties principales composent cet ensemble entièrement électronique. Une partie surveillance et une partie information.

La partie surveillance balaie les 1 200 températures en 1 minute. Des seuils différents par zones sont affichés tenant compte des températures d'entrée des gaz, de la forme du flux, et des températures sur gaines. Suivant les maxima admis, une téléscriptrice indique à chaque balayage d'une minute tout canal en dépassement. Cette indication portant sur l'identification du canal et sa température. Plusieurs seuils donnent des alarmes lumineuses et sonores suivant la valeur de ces dépassements éventuels. De plus, tout canal peut être suivi en permanence et sa température inscrite chaque minute et ce jusqu'à 16 canaux à la fois.

Les différents seuils d'alarme étant réglables rapidement, on conçoit l'intérêt du système lors d'une montée en puissance par exemple. Les températures maxima pouvant varier suivant les zones, le phénomène peut être suivi de près et on connaît à chaque instant les canaux les plus chauds où qu'ils soient.

La partie information est particulièrement agréable pour l'exploitation immédiate. Cette installation, comprenant un calculateur électronique, branchée sur les données de la précédente, délivre, également par téléscriptrice, une carte des 1 200 températures suivant la topographie des canaux. Ces températures peuvent être des valeurs brutes, des valeurs corrigées

par certains paramètres, des écarts par rapport à des températures de référence. La machine calcule également et délivre sous forme de courbe le nombre de canaux par rapport aux valeurs de températures ainsi que toute moyenne par zone ou par secteur. L'exploitant ayant ainsi rapidement à sa disposition une importante quantité de documents, peut intervenir en toute connaissance de cause et modifier en conséquence le pilotage du réacteur. Ce pilotage, rappelons-le, fait intervenir évidemment les barres de contrôle, mais aussi les canaux d'absorbants qui peuvent être modifiés à la demande grâce au chargement permanent en marche du réacteur.

En conclusion, une connaissance exacte, rapide et continue d'un élément aussi important que les températures de chaque canal nous semble primordiale tant pour la sécurité que pour un pilotage correct et une optimisation continue de la puissance permettant un accroissement des performances.

De notre expérience, bénéfique à ces différents points de vue, il nous paraît nécessaire de recommander de telles installations, les plus complètes possibles, pour les centrales de puissance à construire. Cette conclusion rejoint celle du précédent chapitre concernant la Détection de Rupture de Gaines et milite dans le sens d'une automatisation très poussée, du moins en ce qui concerne le contrôle du réacteur.

D'un point de vue plus général, la voie de l'automatisme complet est ouverte par la centralisation de tout le contrôle des réacteurs G 2 et G 3. Les salles de commande de nos réacteurs ont été conçues comme le véritable cerveau unique de l'installation et l'étape suivante sera vite franchie dans l'avenir, qui consiste à traiter les informations électroniquement et à fermer la boucle de l'automatisation intégrale.

## XI - ANOMALIES DE TEMPERATURES DANS LE CAISSON

Ce chapitre traite de phénomènes propres aux réacteurs G 2 et G 3 et tenant essentiellement à la disposition horizontale de ces réacteurs.

Dès la mise en route de G 2, des températures élevées furent remarquées en trois points du caisson, en des lieux où un maximum de 50°C était recommandé en raison de risques d'échauffement du béton. Mentionnons dès maintenant que malgré des valeurs très supérieures à ces 50°C, et un fonctionnement à pleine puissance de 3 mois, ce béton s'est fort bien comporté et n'a donné aucune inquiétude quant à sa tenue et sa résistance.

Le premier point chaud se situait sur la génératrice supérieure du cylindre de béton, à l'intérieur. Cette partie balayée normalement par du gaz froid (secondaire) recevait en fait un certain débit de gaz chaud (primaire). Il était prévu qu'un débit de gaz secondaire froid devait se mélanger au gaz primaire après circulation entre le graphite et l'écran thermique dont il assurait le refroidissement. En raison de la hauteur de l'empilement créant un effet de cheminée, et de la trop grande section de la fuite volontaire, un contre courant s'était établi dans la partie haute de l'empilement et ceci créait l'augmentation de température inopportune dans le caisson.

Des essais effectués en vraie grandeur sur le réacteur G 3 encore à l'arrêt permirent de remédier à cet effet néfaste. La pose de déflecteurs et diaphragmes à l'intérieur même du caisson apportèrent un remède efficace. Par la même occasion, un meilleur balayage de l'ensemble du circuit secondaire était réalisé évacuant ainsi plus aisément les calories nocives qui auraient pu subsister. A signaler au sujet de cette intervention, le travail à l'intérieur du caisson après un fonctionnement de 3 mois à pleine puissance, sans dépassement des doses admises par les services de protection.

Le deuxième point chaud était détecté dans le béton de l'enceinte au passage des tubes de déchargement du combustible. Les calories étaient apportées par un courant de  $\text{CO}_2$  s'établissant par thermo-siphon entre l'intérieur du réacteur et les toboggans de ralentissement des cartouches par l'intermédiaire des tubes de déchargement. Le remède simple a consisté en la pose de clapets sur ces tubes empêchant tout débit de  $\text{CO}_2$  dans cette partie de l'installation.

Le troisième point chaud concernait la coupole du caisson traversée par les tubes de chargement des canaux. Cette coupole est traversée également par les tubes de prélèvement de la Détection de Rupture de Gaines. Ce sont ces derniers tubes qui véhiculaient les calories par circulation parasite entre l'intérieur du réacteur et l'extérieur en raison des différences de pression entre canaux et aussi en raison de la liaison permanente entre ces tubes dans les vannes multivoies de la DRG. Les vannes multivoies ont été modifiées et des clapets posés sur les tubes. Dans le cas de G 3 le problème risquait d'être éliminé par construction, les installations étant différentes. Néanmoins, des clapets furent posés sur les tubes et un meilleur refroidissement des prélèvements de  $\text{CO}_2$  à l'intérieur du réacteur fut étudié et mis en place.

De ces expériences, heureusement sans conséquences néfastes, quelques leçons peuvent être tirées quoique la disposition horizontale de nos réacteurs soit une des causes premières de ces phénomènes. Cette leçon est surtout valable pour des réacteurs à caisson en béton. Certes, nous savons que le béton supporte sans mal des températures élevées tant que toutes ses parties travaillent à la compression. Il n'empêche qu'il est toujours avantageux de rester à des températures basses chaque fois qu'il est possible. Il convient donc d'étudier avec soin toutes les liaisons entre l'intérieur et l'extérieur du réacteur et rendre impossible tout courant de gaz chaud ou froid l'un amenant l'autre, quand il ne s'agit pas de conduites protégées ou calorifugées.

## XII - INSTALLATIONS CLASSIQUES

Le nombre et l'importance des problèmes nouveaux posés par la construction des réacteurs nucléaires a pu faire oublier trop souvent que les installations dites classiques et fonctionnant parfaitement par ailleurs pouvaient à l'occasion créer aussi des difficultés imprévues. Les réalisations de Marcoule n'ont pas entièrement échappé à ce défaut.

Il paraissait évident que des simples réfrigérants à eau donnant habituellement de bons résultats ne devaient en aucun cas susciter d'ennuis majeurs. Ceux que nous employons n'ont pas résisté longtemps à l'action corrosive de l'eau de Rhône. Leur remplacement a été jugé

**nécessaire** ainsi que le traitement de cette eau.

**Les multiples petits compresseurs** que nous employons n'ont pas résisté à l'usage intensif que nous en faisons. Il a fallu reconsidérer leur entretien et modifier une partie des circuits.

**Les garnitures d'étanchéité des machines tournantes** qui semblent parfaites pour d'autres réalisations ont demandé des études nouvelles avant de nous donner satisfaction.

Il serait fastidieux de passer une revue complète des ennuis mineurs rencontrés dans l'exploitation de nos installations. Il est probable que chacun reconnaîtrait au passage des problèmes irritants qu'il a eus à affronter dans des conditions semblables.

Ceci tient-t-il au fait que les techniciens de l'énergie nucléaire demandent à la matière ordinaire plus que ce que d'autres lui demandent habituellement ? ou bien ces techniciens supportent-t-ils plus difficilement les difficultés de second ordre qui viennent fâcheusement interférer sur des problèmes majeurs ?

En tout état de cause il semble que rien n'est entièrement classique dans nos réalisations et que chaque machine, chaque appareil, chaque détail, demande à être essayé longuement, modifié au besoin, avant de prendre place dans un ensemble qui se veut parfait et toujours à l'avant-garde de toutes les techniques.

### XIII - CONCLUSION

La conclusion générale concernera uniquement ce qui dans les réacteurs de Marcoule peut être considéré comme original et peut attirer les réalisateurs des futures centrales en ce qui concerne le réacteur proprement dit.

Nous sommes convaincus que le béton précontraint tiendra toutes ses promesses. Nous témoignons de sa facilité de mise en oeuvre, de la sécurité qu'il apporte pour des réalisations importantes, de sa possibilité d'être employé à grande échelle, de la commodité de sa surveillance.

Nous confirmons les avantages considérables apportés par un chargement en marche capable de fortes cadences, dans l'économie du combustible, l'optimisation de la puissance, la facilité du pilotage.

Nous pensons que l'automatisme dans la surveillance et le contrôle permettre des performances accrues grâce à la sécurité et à l'agrément qu'il apporte à l'exploitation.

**A D D I T I F**

**CONCERNANT QUELQUES POINTS PARTICULIERS**

**exposé oral, complétant les chapitres précédents, fait devant la Société  
Européenne de l'Energie Atomique, au colloque de Cannes le 8 octobre 1962**

**Le texte qui précède traite de faits d'expérience de nos réacteurs de Marcoule et essaie d'en tirer quelques principes applicables aux centrales futures. Dans cette optique, il est normal que les incidents survenus, et relatés en toute franchise, occupent une grande place dans ce rapport, puisque c'est d'eux que viennent les améliorations. Améliorations permettant à ces réacteurs un fonctionnement actuel très sûr et très au-dessus des prévisions.**

**Je vais maintenant compléter rapidement quelques points particuliers.**

## I - SECURITE DU CAISSON EN BETON PRECONTRAINTE

En premier lieu, je tiens à préciser un point concernant les caissons en béton précontraint, caractéristique concernant la sécurité.

J'ai écrit, que l'explosion des maquettes au 1/10 était intervenue à une pression supérieure à  $60 \text{ kg/cm}^2$ . Il ne faut pas en conclure qu'une telle explosion est possible dans le cas normal même à cette pression élevée. En effet, il a fallu des conditions spéciales pour obtenir cette explosion. L'eau servant à l'épreuve a dû être injectée à très grand débit pour réussir à accroître la pression malgré les fuites qui se sont déclarées avant cette explosion. Normalement, comme cela a été indiqué dans la communication de MM. HOROWITZ et ROUX parlant des maquettes E. D. F. 3, il ne doit pas y avoir explosion. Le béton se fissure, une fuite se déclare provoquant un abaissement de la pression intérieure et le phénomène s'arrête immédiatement, car la fissure se reforme d'elle-même et sans redevenir étanche, permet à la pression de décroître lentement sans dégâts supplémentaires. L'incident se résume alors en une fuite du fluide refroidisseur, fuite assez lente pour ne pas être dévastatrice.

Il est donc bien exact de dire qu'un caisson en béton précontraint est inexplosible.

## II - LES CABLES DE PRECONTRAINTE

J'ai, par ailleurs, mentionné une erreur d'exploitation en ce qui concerne les câbles de précontrainte. Je tiens à préciser à nouveau les causes de la corrosion apparue sur certains câbles. Je ne puis détailler mieux les agents liquides annoncés comme principaux coupables, mais ceux d'entre vous qui ont connu la fièvre d'un chantier, mené en un temps record, comprendront pourquoi le personnel n'a pas pris plus de précaution alors qu'il ne s'agissait, dans ce cas, que de génie civil. La propreté nucléaire n'ayant rien à faire dans un béton quel qu'il soit. Je confirme donc, s'il en est besoin, que le câble habituel, maintenu normalement en état de propreté, est resté en parfaite condition et assure son rôle parfaitement.

## III - CHARGEMENT ET DECHARGEMENT EN MARCHE

Pour ce qui est du chargement et déchargement en marche des réacteurs G 2 - G 3, on m'excusera d'insister à nouveau sur l'antériorité de ces réalisations. Mais ces piles étant les seules expériences dans ce domaine, il convient que nous en tirions le maximum d'enseignements profitables à tous pour la mise en oeuvre de telles installations dans l'avenir.

Puis-je me permettre de signaler au passage que les performances citées dans mon rapport, sont prudentes et concernent des résultats d'exploitation sur une très longue période. Malgré les incidents relatés, inévitables dans une installation originale, les résultats sont, en définitive, particulièrement brillants. Les performances actuelles sont d'ores et déjà supérieures



et continuent à s'accroître. Reprenant la phrase de ma communication, je préciserai donc que l'installation de chargement en marche de G 2 - G 3, est capable de renouveler totalement le combustible d'un réacteur en moins de 2 mois. Ceci se chiffre par une moyenne de 25 canaux par jour, soit 2,5 t/jour ou 75 t par mois. Il s'agit là de performances correspondant à un fonctionnement normal, entretien systématique compris, et non à des cadences de pointes.

On pourra objecter que ces performances sont bien inutiles pour des réacteurs de puissance à forte irradiation tels qu'ils sont envisagés pour les centrales futures. Je ne pense pas que trop de bien ait jamais nui.

De plus, les réacteurs en construction, ayant un nombre de canaux important, demandent des performances de chargement élevées afin de profiter au maximum des avantages d'une telle installation.

Je rappellerai rapidement ici les principaux de ces avantages :

- économie de combustible,
- homogénéité de l'irradiation permettant la permanence du réseau d'absorbant,
- ou, au contraire, constance de la réactivité par modification du réseau,
- homogénéité des températures,
- possibilité d'aplatissement longitudinal du flux, commode,
- gain énorme de temps,
- accroissement du facteur de charge, surtout si les arrêts pour entretien d'autres installations sont réduits.

#### IV - DECHARGEMENT ET MISE EN CONTAINERS

Il me semble utile d'ajouter quelques mots au sujet de la mise en containers et de l'évacuation du combustible irradié.

Tout d'abord, la mise en containers.

Cette installation était une de celles qui nous inquiétait le plus à l'époque du projet. Trier un combustible sortant de pile, le mettre en boîtes étanches et l'expédier à la piscine de désactivation, ceci à cadence industrielle, semblait à l'époque d'une inquiétante complexité.

Grâce à une mise au point en inactif assez poussée, la mise en service en actif a été relativement facile. Je passerai sur les ennuis inévitables des premiers mois pour en arriver à l'exploitation industrielle qui fonctionne donc depuis plus de 3 ans.

J'ai donné, par ailleurs, des cadences de l'installation chargement déchargement, cette cadence est limitée par le chargement lui-même. La mise en containers peut assurer des performances doubles.

Nous avons longtemps considéré cette mise en containers comme étant un impératif embarrassant. Il nous semble actuellement que les avantages considérables qu'en tire le stockage en piscine compense très largement les investissements de cette installation.

Par ailleurs, beaucoup de précautions prévues à l'époque du projet sont inutiles et une mise en containers moderne serait plus simple. Certaines opérations seraient supprimées, par exemple le refroidissement intermédiaire du combustible avant soudage.

Actuellement, le déroulement des opérations est le suivant :

- déchargement du canal,
- refroidissement d'une 1/2 heure dans du CO<sub>2</sub> en pression, (ce temps peut être fortement réduit sans inconvénient),
- mise à l'air libre du combustible,
- mise en boîte,
- rétreint des containers,
- soudage,
- transport hydraulique à la piscine.

Depuis la mise à l'air libre des cartouches jusqu'à l'arrivée en piscine, il s'écoule moins de 4 minutes.

Le stockage en piscine profite largement des facilités de la livraison du combustible en boîtes étanches.

Le transport par conduit hydraulique souterrain supprime toute manutention, il est sans aléas et d'une parfaite régularité.

30 secondes sont suffisantes pour le transport d'un container sur les installations de pesage, triage et stockage sous l'eau de la piscine.

Là aussi, tout se passe par télécommande, sans heurts.

Le côté spectaculaire de ces opérations provient surtout de cette facilité et de cette sûreté déconcertantes qu'il n'est pas habituel de voir pour une telle manutention.

Il convient de remarquer également l'avantage supplémentaire que procure une eau de piscine non contaminée, où le temps de séjour du combustible importe peu puisqu'il est à l'abri de toute attaque extérieure.

## V - LES TURBO-SOUFFLANTES

Il est une autre originalité de nos réacteurs de Marcoule que je n'ai pas étudiée dans mon rapport :

Le soufflage du gaz de refroidissement est assuré par des turbo-soufflantes prélevant de la vapeur MP sur les échangeurs. Une souplesse considérable résulte de cette conception. Il n'est pas utile de faire ressortir les autres avantages puisqu'aussi bien il apparaît nécessaire de se tourner à l'avenir vers de telles réalisations, en raison des puissances élevées qu'atteignent les soufflantes dans des projets plus récents.

## VI - CONCLUSION

Je voudrais, en conclusion, essayer de dégager les promesses mises en lumière par quelques années d'expérience dans l'exploitation de nos réacteurs de Marcoule.

Une énumération doit suffire :

- caisson en béton précontraint,
- chargement en marche,
- mise en containers et évacuation automatique du combustible,
- autonomie du soufflage,
- contrôle des températures et des gaines très automatisé,
- centralisation des mesures introduisant l'automatisme complet.

Toutes ces techniques, que nous nous apprêtons à mettre en oeuvre dans les 10 prochaines années de façon plus généralisée, sont donc des techniques éminemment valables, nous pouvons en attester.

Forts de notre expérience et de notre réussite, nous sommes assurés pour elles d'un avenir brillant.

*Manuscrit reçu le 11 février 1963.*



**FIN**