

22 janvier 2009

## Synthèse du rapport de l'IRSN sur le redémarrage du réacteur CABRI

### Le contexte

Le Commissariat à l'Énergie Atomique (CEA), exploitant du réacteur CABRI (voir présentation en annexe), a défini au début 2000 des modifications de son installation pour :

- la mise en place d'une boucle expérimentale à eau sous pression au centre du cœur du réacteur, appelé cœur nourricier, en remplacement de l'ancienne boucle en sodium,
- la réévaluation de la sûreté de son installation.

En 2002, l'exploitant a transmis à l'Autorité de Sûreté Nucléaire (ASN) un rapport préliminaire de sûreté (RPrS) en vue de la réalisation de ces modifications ; ce rapport préliminaire de sûreté a été examiné par l'Institut de Radioprotection et de Sûreté Nucléaire (IRSN) qui a présenté ses conclusions devant le Groupe Permanent d'experts pour les réacteurs nucléaires (GPR) lors de trois réunions tenues en 2004.

A l'issue de cet examen, l'ASN a indiqué qu'elle n'avait pas d'objection à la poursuite du projet sous réserve de la prise en compte d'un certain nombre de demandes. En 2007, l'exploitant a transmis, en vue du redémarrage de l'installation modifiée, le rapport provisoire de sûreté (RPS) de l'installation, des documents associés ainsi que les Règles Générales d'Exploitation (RGE). L'ensemble de ces documents a été examiné par l'IRSN qui a présenté ses conclusions devant le GPR lors des réunions des 2, 22, 23 octobre 2008 et du 22 janvier 2009. Les différents points examinés par l'IRSN sont présentés ci-dessous.

### Conception, réalisation et suivi en service de la nouvelle boucle d'essai à eau pressurisée

La nouvelle boucle d'essai en eau pressurisée doit permettre de tester le comportement de combustible irradié lors d'un transitoire rapide d'injection de réactivité. Pour ce faire, le combustible d'essai sera placé dans la partie de la boucle située au sein du cœur nourricier. Cette partie sera réalisée en Zircaloy compte tenu du besoin expérimental de transparence neutronique.

L'IRSN a estimé que les essais réalisés par l'exploitant permettent de valider les caractéristiques mécaniques retenues pour ce matériau dans les études de dimensionnement. L'IRSN a également considéré que les dispositions mises en œuvre pour la fabrication de cette partie, la plus sensible de la boucle, sont acceptables. L'exploitant a pris l'engagement de présenter un programme de suivi en exploitation adapté, ce qui est satisfaisant.

D'une manière générale, l'IRSN a estimé que la démarche mise en œuvre par l'exploitant pour le dimensionnement des différents éléments de la nouvelle boucle d'essai est correcte. En particulier, les conséquences de l'interaction combustible-eau qui pourraient résulter de la rupture de la gaine du combustible d'essai ont correctement été prises en compte.

### Réévaluation du système de protection limitant l'injection de réactivité lors des essais

L'injection de réactivité nécessaire aux essais réalisés dans le réacteur est générée par la dépressurisation de quatre barres insérées dans le cœur nourricier et remplies d'un gaz neutrophage. Une mauvaise maîtrise de la séquence de dépressurisation pourrait conduire à une injection de réactivité de nature à endommager les crayons du cœur nourricier.

Les remarques formulées par l'IRSN à propos du système de protection existant ont conduit l'exploitant à proposer la mise en œuvre d'un système de protection complémentaire indépendant du premier. L'IRSN a estimé que la solution proposée était satisfaisante. Néanmoins l'exploitant doit encore fournir des éléments concernant les performances des deux systèmes.

### **Examen de l'état des crayons combustibles du cœur nourricier**

L'exploitant a procédé à des examens non destructifs de neuf des 1488 crayons du cœur nourricier afin de vérifier qu'ils n'avaient pas subi de dommages non prévus lors des transitoires d'injection de réactivité subis depuis sa mise en exploitation. L'examen des deux crayons les plus « chauds » du cœur, à savoir ceux produisant la plus forte puissance en fonctionnement, a mis en évidence des déformations circonférentielles importantes et inattendues de la gaine (la gaine permet de confiner les matières radioactives à l'intérieur des crayons combustibles). Les sept autres crayons examinés, produisant tous une puissance inférieure, n'ont montré que de faibles déformations de la gaine. L'exploitant a donc procédé à des examens (destructifs) complémentaires sur un des deux crayons fortement déformés qui ont révélé une fusion à cœur des pastilles de combustible situées en regard des zones de déformation de la gaine. L'exploitant a établi un lien direct entre la déformation importante de la gaine et la fusion à cœur des pastilles de combustible.

L'IRSN n'a pas remis en cause ces conclusions.

L'exploitant a décidé de remplacer, par des crayons combustibles neufs, le crayon expertisé et les trois autres crayons du cœur nourricier produisant une puissance équivalente à celle produite par le crayon expertisé. L'exploitant a estimé, sur la base des résultats des examens non destructifs réalisés, que les autres crayons du cœur ne produisaient pas une puissance suffisante pour craindre qu'ils puissent être endommagés.

L'IRSN a jugé l'analyse de l'exploitant acceptable.

La fusion observée constitue une anomalie puisque l'exploitant réalise préalablement à chaque transitoire, en application de règles d'exploitation approuvées par l'ASN, des calculs visant notamment à vérifier que le transitoire ne risque pas de provoquer de rupture de gaine (afin d'éviter la dispersion de matières radioactives dans les circuits du réacteur), ni de fusion du combustible.

L'exploitant a réalisé une analyse détaillée des transitoires subis par le cœur nourricier et a conclu que la fusion du combustible et les déformations associées résultaient d'un transitoire, réalisé en 1995, caractérisé par une augmentation lente de la puissance du réacteur, très différent des transitoires rapides de puissance habituellement réalisés.

L'IRSN a considéré que les explications de l'exploitant étaient acceptables et a noté que de tels transitoires ne seraient plus réalisés.

### **Réévaluation des études de sûreté associées au cœur nourricier**

Lors des analyses réalisées, il est apparu que des paramètres importants étaient mal estimés par les programmes de calcul mis en œuvre pour les études de sûreté conduites préalablement à la réalisation des transitoires d'injection de réactivité, ce qui explique que la fusion n'ait pas été prédite.

L'exploitant a donc mis au point un programme de calcul, constitué de deux codes de calcul, pour modéliser le comportement des crayons combustibles lors des transitoires d'injection rapide de réactivité programmés dans l'installation.

Les remarques formulées par l'IRSN, notamment concernant les problèmes de couplage entre les deux codes de calcul, ont conduit l'exploitant à finalement mettre au point un programme de calcul fondé sur un seul code de calcul spécifiquement adapté. L'IRSN a considéré que cette solution était la plus pertinente.

Les évolutions apportées pour tenir compte des incertitudes mises en évidence lors des analyses réalisées pour identifier l'origine de la fusion font que les résultats obtenus par ce nouveau programme de calcul ne permettent pas de garantir, pour les futurs transitoires de puissance, le respect du critère retenu jusqu'alors pour vérifier l'absence de risque de rupture de gaine.

S'appuyant sur le fait que nombre de transitoires réalisés par le passé ont sollicité les crayons combustibles plus qu'ils ne le seront dans le futur, et ce sans qu'aucune rupture de gaine ne soit détectée, l'exploitant a proposé de fonder dorénavant la démonstration de non-rupture de gaine lors d'un transitoire sur la vérification du respect de deux critères associés à la déformation circonférentielle et à la température de la gaine. L'IRSN a considéré que les critères proposés par l'exploitant étaient pertinents mais que l'abandon du critère initial nécessitait d'examiner d'autres modes de défaillance de la gaine (fluage thermique, oxydation et déformation progressive) ; ces études ont ensuite été réalisées par l'exploitant et leurs résultats ont été jugés convaincants par l'IRSN.

L'IRSN a également réalisé une étude pour comparer l'énergie que devrait libérer un crayon du cœur nourricier lors d'un transitoire rapide pour provoquer l'atteinte des nouveaux critères à celle identifiée comme représentative d'une limite de rupture sur la base d'essais effectués aux Etats-Unis et au Japon. Cette étude a montré la cohérence des critères pour les transitoires envisagés dans CABRI.

Finalement, les résultats de la simulation par le programme développé spécifiquement permettent de conclure que les déformations de la gaine et les températures de la gaine et du combustible qui seront atteints lors des futurs essais respecteront les nouveaux critères.

Il reste toutefois à l'exploitant à apporter la justification de la puissance considérée dans les études lorsque le système de protection visant à limiter l'injection de réactivité est supposé défaillant.

## **Examen de l'état des équipements existants « essentiels pour la sûreté »**

Outre le cœur nourricier, l'exploitant a identifié une liste d'équipements dits essentiels pour la sûreté pour lesquels il a établi un programme d'inspection visant à s'assurer que leur état demeure compatible avec leur fonction de sûreté et à engager, si nécessaire, les actions correctives.

L'IRSN a estimé que la liste proposée par l'exploitant d'équipements « essentiels », visant à garantir d'une part la réalisation des fonctions fondamentales de sûreté, d'autre part la non-agression des matières nucléaires était acceptable. L'IRSN a également considéré que la démarche mise en œuvre pour établir le programme d'inspection, fondée notamment sur une réévaluation des dispositions de conception et de réalisation, la prise en compte du retour d'expérience et des conditions d'exploitation était satisfaisante.

Un examen détaillé de la déclinaison pratique de cette démarche a été réalisée pour la cuve-piscine et le circuit de refroidissement du cœur. L'étendue du programme d'inspection, les moyens mis en œuvre, la démarche de traitement des défauts ont été jugés satisfaisants. Les premiers résultats des contrôles effectués sur les tuyauteries interne et externe d'alimentation et de relevage d'eau de refroidissement du cœur ont montré le bon état de ces équipements.

Pour ce qui concerne le pont roulant, l'IRSN réévalue actuellement la nécessité de réaliser des contrôles plus performants que les seuls contrôles visuels prévus par l'exploitant pour disposer d'un état des soudures.

## **Réévaluation du risque sismique**

### Génie civil

Le diagnostic du génie civil réalisé par l'exploitant au début de son projet de réévaluation de sûreté l'avait conduit à conclure à la nécessité de renforcer le bâtiment du réacteur afin de garantir sa stabilité sous séisme. Le projet de renforcement présenté par l'exploitant en vue du redémarrage

de l'installation vise, en complément, à préserver au mieux la capacité de rétention du bâtiment après séisme, ce qui est satisfaisant.

Le projet de renforcement des superstructures est satisfaisant. Il consiste à renforcer les poteaux et les poutres des superstructures et à mettre en place des liernes et une poutre de couronnement. L'exploitant s'est engagé à examiner la possibilité d'améliorer la liaison entre les liernes (et la poutre de couronnement) et les poteaux d'angle, ce qui est satisfaisant.

Le projet de renforcement des infrastructures consiste en la mise en place de bandes de tissus de fibres de carbone (TFC) sur les faces internes des voiles Est et Sud afin d'améliorer le comportement en flexion en cas de séisme. Cette solution est acceptable ; néanmoins, compte tenu du caractère fragile du matériau choisi, l'IRSN a estimé nécessaire que l'exploitant complète les études nécessaires à la définition des zones à renforcer et des surfaces associées.

Par ailleurs, l'IRSN a estimé que la réalisation des renforcements prévus pour les bâtiments situés autour du bâtiment du réacteur garantira leur stabilité en cas de séisme et la non-agression du bâtiment du réacteur. Les dispositions prises par l'exploitant pour garantir la non-agression en cas de séisme du bâtiment du réacteur par sa propre cheminée devront être examinées.

Enfin, l'IRSN a estimé nécessaire que l'exploitant présente des spectres transférés<sup>1</sup> mis à jour ainsi que leur validation.

#### Pont roulant

L'exploitant a évalué le comportement du pont roulant en cas de séisme et proposé des modifications afin de garantir notamment sa stabilité.

L'IRSN a estimé nécessaire que certaines hypothèses soient justifiées dans le cadre de la mise en œuvre des modifications envisagées.

#### Dispositions visant à garantir la mise à l'arrêt sûr du réacteur

Compte tenu des désordres mécaniques qui pourraient impacter la chute des barres de commande et de sécurité après un séisme, l'exploitant a mis en place un arrêt automatique du réacteur sur détection sismique. L'évaluation faite par l'IRSN a conclu à la nécessité de modifier l'architecture de ce système afin d'en améliorer la fiabilité et de justifier les seuils de déclenchement en regard de l'objectif de chute des barres avant l'arrivée des ondes sismiques les plus préjudiciables. Par ailleurs, l'IRSN a estimé nécessaire que l'exploitant justifie que les chocs entre assemblages lors d'un séisme ne sont pas de nature à remettre en cause le maintien d'une géométrie « refroidissable » du cœur.

Enfin l'IRSN a estimé que l'exploitant devrait définir une procédure pour la gestion post-sismique sur l'installation.

## **Réévaluation du risque incendie**

L'exploitant a procédé à une réévaluation d'ensemble du risque lié à un incendie.

L'IRSN a examiné les moyens de prévention, de détection, d'intervention et de lutte contre l'incendie. L'IRSN a également étudié les dispositions de limitation de propagation d'un incendie proposées par l'exploitant qui visent à garantir la protection des équipements participant aux fonctions « mise et maintien à l'état sûr de l'installation » et « refroidissement du cœur ». L'ensemble de ces dispositions ont été jugées globalement satisfaisantes.

En complément, l'exploitant a entrepris une étude visant à vérifier la stabilité au feu des bâtiments qui devra être examinée avant le redémarrage de l'installation.

---

<sup>1</sup> Les spectres transférés doivent être calculés pour être utilisés en données d'entrée des calculs de tenue sismique des équipements qui ne sont pas directement fondés dans le sol.

## Réévaluation des conséquences radiologiques en cas d'accident

Les conséquences radiologiques sur le public en cas d'accident sur l'installation sont très faibles et n'appellent pas de remarque particulière.

L'évaluation des conséquences sur le personnel a conclu à la nécessité de définir des dispositions spécifiques pour les opérations à risque radiologique.

## Réévaluation des conditions d'exploitation

### Radioprotection du personnel

Le dimensionnement de l'ensemble des protections biologiques liées à l'exploitation de la boucle à eau pressurisée est satisfaisant. Il en est de même des études d'optimisation spécifiques aux différents postes de travail exposés dans l'installation.

### Prise en compte des facteurs humains et organisationnels

L'IRSN a examiné l'intégration des facteurs organisationnels et humains dans le cadre du futur redémarrage de l'installation suite aux travaux de remplacement de la boucle d'essai en sodium par une boucle à eau pressurisée et aux travaux identifiés dans le cadre du réexamen de sûreté. L'IRSN a examiné également l'impact des modifications sur l'exploitation, les actions destinées à maintenir les compétences des personnels, la documentation opérationnelle ainsi que les opérations sensibles pour la sûreté.

L'IRSN a estimé que les essais de redémarrage de l'installation devront être mis à profit pour évaluer les activités sensibles sous l'angle des facteurs humains et organisationnels

## Conclusion

A la demande de l'Autorité de Sûreté Nucléaire (ASN), l'IRSN a expertisé les dossiers de sûreté transmis par l'exploitant en vue du redémarrage à l'issue des travaux. Cette expertise a principalement conduit l'exploitant à reprendre entièrement sa démonstration concernant le comportement du cœur nourricier du réacteur lors des essais d'injection de réactivité. Elle a également conduit l'exploitant à renforcer son système de contrôle-commande pour prévenir tout risque d'injection de réactivité non maîtrisée. Les conclusions du rapport d'expertise rédigé par l'IRSN à cette occasion ont été présentés devant le Groupe Permanent « Réacteurs » qui a dans son ensemble validé les positions de l'IRSN.

L'IRSN souligne qu'un nombre important de remarques concernant le Rapport Provisoire de Sûreté et les Règles Générales d'Exploitation a été formulé. Ces documents devront être mis à jour et transmis pour examen en vue de leur approbation pour le redémarrage de l'installation.

## Annexe

### Présentation du réacteur CABRI

#### Où est situé le réacteur CABRI ?

Le réacteur CABRI est implanté sur le site de Cadarache (Bouches du Rhône), à une quarantaine de kilomètres d'Aix-en-Provence. Ce site relève du Commissariat à l'Energie Atomique (CEA) de Cadarache.

#### A quoi sert le réacteur CABRI ?

Le réacteur CABRI permet de reproduire divers transitoires rapides de puissance afin d'étudier le comportement d'un crayon combustible expérimental, et notamment le risque de rupture de gaine, soumis à ce type de sollicitations.

#### Comment fonctionne le réacteur CABRI ?

Le réacteur CABRI (voir la figure n°1) est un réacteur de type piscine, refroidi par de l'eau sous faible pression dont la puissance thermique du cœur vaut au maximum 25 MW lorsque le réacteur fonctionne en palier stable. Un système d'échangeurs rejette la chaleur produite dans l'atmosphère.

Le combustible nucléaire est de l'oxyde d'uranium faiblement enrichi en uranium 235. Le cœur du réacteur, désigné par « cœur nourricier », comporte en tout 1488 crayons combustibles.

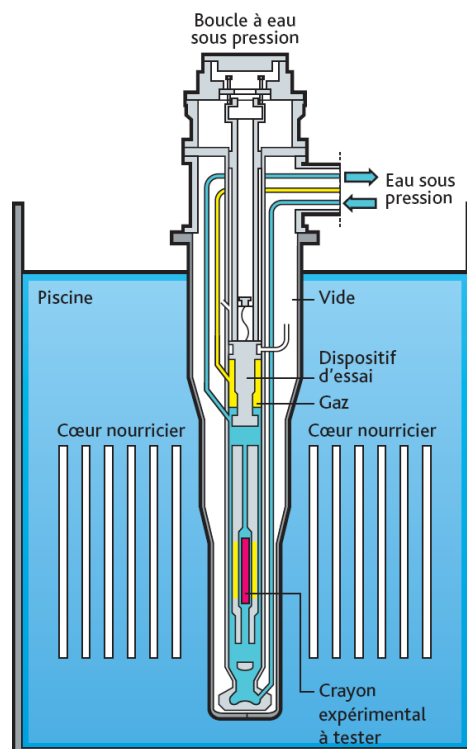


Figure n°1 : Vue de la piscine du réacteur CABRI  
(Crédit illustration : Stéphane Jungers)

Le réacteur comporte au milieu des 1488 crayons combustibles des réservoirs contenant l'isotope 3 de l'hélium qui est un gaz absorbant très fortement les neutrons (gaz dit neutrophage). Pour obtenir un transitoire rapide (pic) de puissance il faut augmenter rapidement la réactivité qui caractérise la quantité de neutrons existant dans le cœur nourricier. La dépressurisation rapide des réservoirs d'hélium supprime le matériau neutrophage et augmente ainsi la quantité de neutrons. La puissance du réacteur passe ainsi de quelques centaines de kilowatts à 20 millions de kilowatts en quelques millisecondes (voir la figure n°2) puis revient tout aussi vite à une valeur proche de sa valeur initiale.

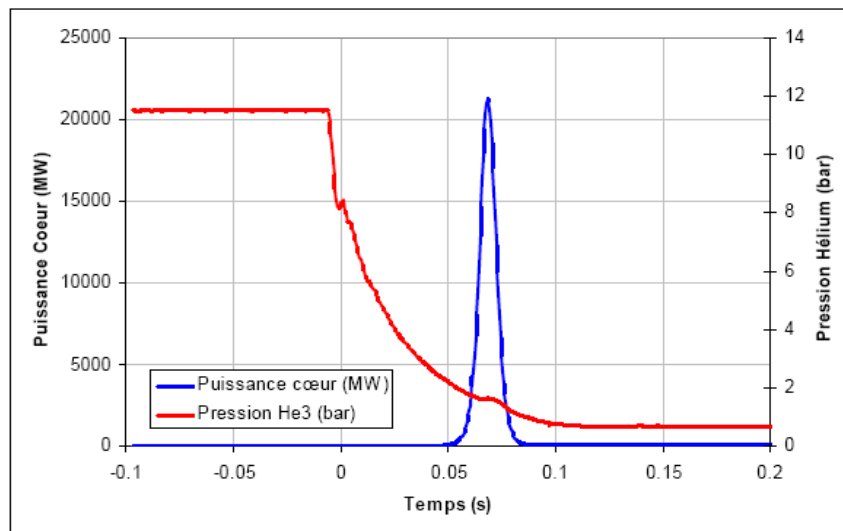


Figure n°2 : Exemple de transitoire rapide de puissance

### La boucle expérimentale

Au centre du cœur nourricier se trouve une boucle expérimentale dans laquelle est placé le crayon combustible, dit crayon d'essai expérimental, dont on veut étudier le comportement. Ce crayon d'essai est différent des crayons du cœur nourricier. Une partie de la puissance produite dans le cœur nourricier lors du transitoire rapide est transférée au crayon d'essai au travers des parois délimitant la boucle expérimentale. Les résultats de ces essais sont utilisés dans le cadre de la recherche relative à la sûreté des combustibles.

### La modification en cours

Entre 1978 et 2003, la boucle expérimentale reproduisait les conditions de fonctionnement des réacteurs à neutrons rapides refroidis au sodium (comme Phénix et Superphénix). Les travaux actuellement en cours visent à remplacer cette boucle expérimentale par une boucle à eau sous pression reproduisant les conditions de fonctionnement des Réacteur à eau sous pression (REP) du parc nucléaire d'EDF (pression de 155 bars et température autour de 300°C).