



RÉGIME VIBRATOIRE DES AIGUILLES ET ASSEMBLAGES COMBUSTIBLES DU RÉACTEUR PHÉNIX

par **R. GINIER** et **M. PONTIER**
Ingénieurs C.E.A., Cadarache

Introduction

Dans les réacteurs rapides, refroidis au sodium, les assemblages constituent un composant important et délicat soumis à des conditions de fonctionnement sévères (température et vitesse du sodium...).

Parmi les études hydrauliques liées à la technologie de l'assemblage, un effort important est consacré à l'étude des vibrations des assemblages et des faisceaux d'aiguilles immergés dans un écoulement de sodium de direction quasi parallèle à l'axe des aiguilles. Ces études ont pour objectif de s'assurer que, compte tenu des solutions retenues pour le supportage ou l'écartement des différents éléments, ceux-ci ne sont soumis, durant leur séjour en pile, à aucune fatigue dangereuse pour la sécurité du réacteur.

Description de l'assemblage et des aiguilles (figure 1)

Le combustible des réacteurs rapides se présente sous forme « d'aiguilles » d'un diamètre de l'ordre de 6 à 7 mm et de longueur variable suivant le réacteur; dans Phénix elles atteignent près de 180 cm. Ces aiguilles, entourées d'un fil hélicoïdal qui sert d'espaisseur, sont rassemblées en faisceau et placées à l'intérieur de tubes hexagonaux, avec le jeu nécessaire pour le montage. Au-dessus du faisceau est placé un élément massif de protection neutronique; au-des-

sous, un pied rond sert de support et permet l'alimentation du faisceau en sodium. L'ensemble de ces éléments constitue l'assemblage combustible qui, dans le cas de Phénix, a une longueur totale de 4,3 m (dont 0,8 m pour le pied) avec un entreplat de l'ordre de 12 cm.

Les assemblages sont placés sur un « sommier » — support avec entre eux un certain jeu, et pour assurer le contact entre eux lorsque le réacteur est en puissance, les tubes hexagonaux présentent sur les six faces et au niveau du plan médian des aiguilles combustibles, de petites sur-épaisseurs appelées plaquettes.

Au-dessus du cœur constitué par les assemblages combustibles, se trouve le « couvercle-cœur », structure utilisée comme brise jet et comme support de l'instrumentation. Autour du cœur sont placés les assemblages fertiles formant la couverture et dans lesquels les débits et les vitesses de sodium sont beaucoup plus faibles.

La puissance dégagée dans les aiguilles combustibles est évacuée par le sodium qui circule dans le faisceau à une vitesse de l'ordre de 7 m/s. Compte tenu des vitesses atteintes, des jeux disponibles entre aiguilles ou entre assemblages, les risques de vibrations ne sont pas à exclure *a priori* et ont nécessité un certain nombre d'études ou d'essais.

Par suite des difficultés d'instrumentation en sodium ces essais ont été réalisés sur un modèle à l'échelle 1 dans lequel les écoulements de sodium à 400 °C sont simulés par des écoulements d'eau à 20 °C; on a pu ainsi facilement combiner la similitude mécanique de la structure qui implique des vitesses identiques sur le modèle et le prototype avec la similitude hydraulique de Froude.

Dans ces conditions, la similitude de Reynolds n'est pas respectée, mais on peut admettre que la distorsion d'un facteur 3 de ce paramètre n'est pas de nature à remettre en cause les résultats obtenus, d'autant plus que le Reynolds modèle est assez élevé pour qu'on puisse en négliger son influence (de l'ordre de 70 000 dans le réacteur).

Etude des vibrations des assemblages

L'assemblage peut être assimilé à une poutre de masse non uniformément répartie, comprenant une extrémité supérieure libre très lourde (correspondant grosso modo à l'élément de protection neutronique), deux appuis intermédiaires (plaquettes et portée sphère-cône) et un encastrement (guidage du pied) et soumise à l'effet de différentes sources d'excitation dues à l'écoulement à l'intérieur de l'assemblage et à la sortie de l'assemblage et sous le couvercle cœur.

Banc d'essais et instrumentation.

L'écoulement de sodium sous le couvercle cœur peut être considéré comme ayant une symétrie d'ordre 6. Dans notre étude, nous n'avons donc représenté que le sixième

du cœur et du couvercle à l'échelle 1 avec les différentes zones de débits (fig. 2).

Dans le secteur représenté, l'assemblage étudié en vibrations peut occuper trois positions jugées *a priori* importantes. Les autres assemblages sont simulés par des tubes de manière à obtenir à leur extrémité les mêmes vitesses que dans le réacteur.

Un circuit spécial permet l'alimentation de l'assemblage instrumenté; ce dernier repose sur un faux sommier qui lui-même supporte un tube très rigide permettant d'exercer au niveau des plaquettes de l'assemblage étudié des efforts d'amplitude réglable et de représenter ainsi l'effort de blocage qu'exercent les assemblages voisins (fig. 3 et 4).

En dehors des appareils de mesures hydrauliques tels que moulinets et manomètres, les moyens de mesures des vibrations sont de deux types :

— d'une part des accéléromètres type « vibrometer » placés suivant deux directions perpendiculaires X et Y et à deux niveaux différents, en des points où les amplitudes des vibrations doivent être maximales;

— d'autre part, sur deux faces à 120°, le long d'une génératrice, des jauges de contraintes.

Traitement des signaux.

Les signaux électriques provenant des accéléromètres sont enregistrés, sans aucun traitement, soit sur papier photographique, soit sur bandes magnétiques. Devant le caractère très aléatoire des signaux, aucune conclusion précise ne peut être faite par une analyse simple des signaux fournis et on a dû faire subir différents traitements aux enregistrements à savoir :

a) Calcul de la densité spectrale.

On étudie l'évolution du signal $x(t)$ par rapport à lui-même à des intervalles de temps « τ », ce qui donne la fonction :

$$R_{x^2}(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{2T} \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) x(t - \tau) dt$$

Ensuite, soit avec un programme approprié, soit avec un transformateur de Fourier, on obtient la transformée de Fourier qui n'est autre que la densité spectrale :

$$G_{x^2}(\omega) = 2 \int_{-\infty}^{+\infty} R_{x^2}(\tau) e^{-j\omega\tau} d\tau$$

Cette densité spectrale nous donne toutes les fréquences contenues dans le signal étudié.

b) Analyse statistique.

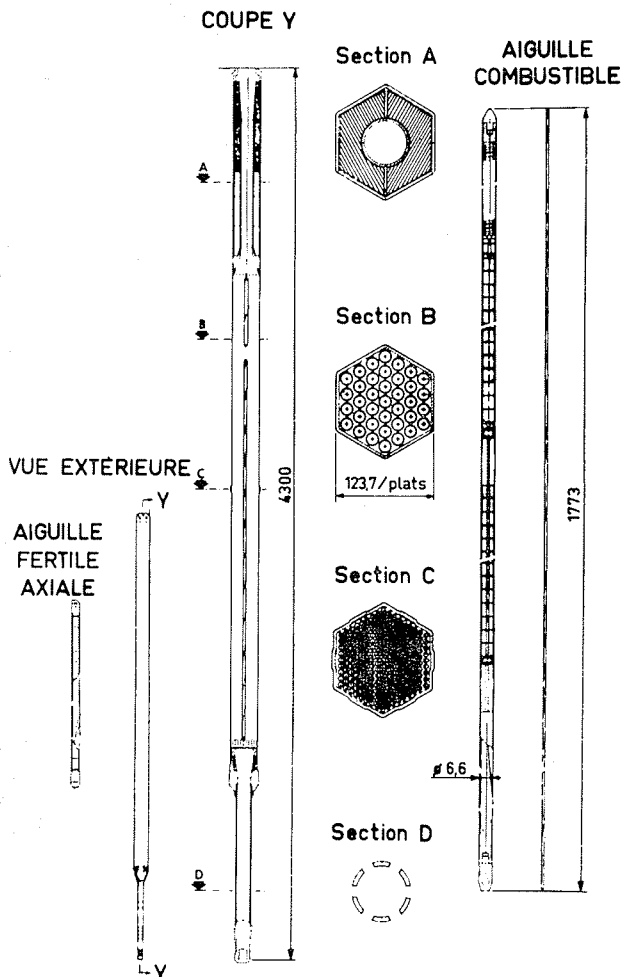
Le signal filtré, puis composé est traité statistiquement de manière à faire ressortir tous les maxima d'accélération en fonction du nombre de fois qu'ils apparaissent; cette analyse nous permet de connaître l'accélération qui a la plus grande probabilité d'apparaître.

Les essais et leurs résultats.

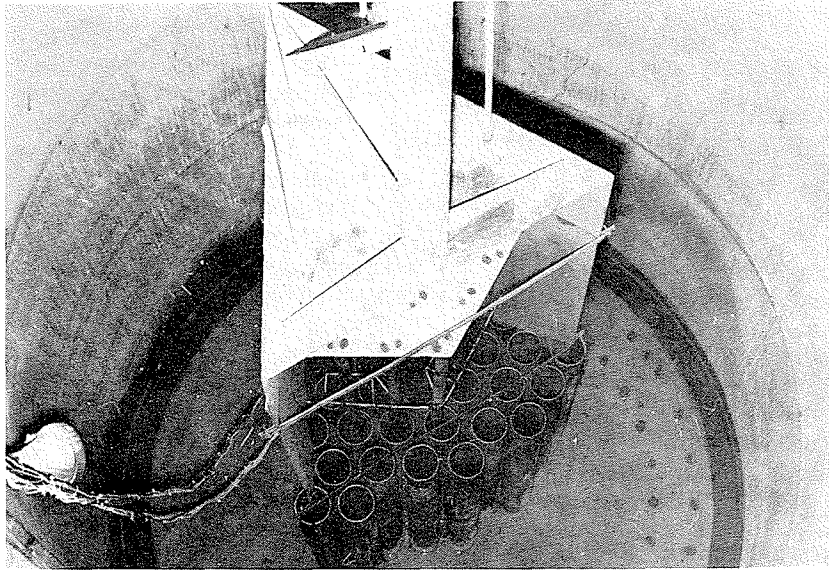
Les essais ont comporté les mesures suivantes :

a) Mesure en air et en eau de la fréquence propre de l'assemblage pour différentes forces d'appuis aux plaquettes.

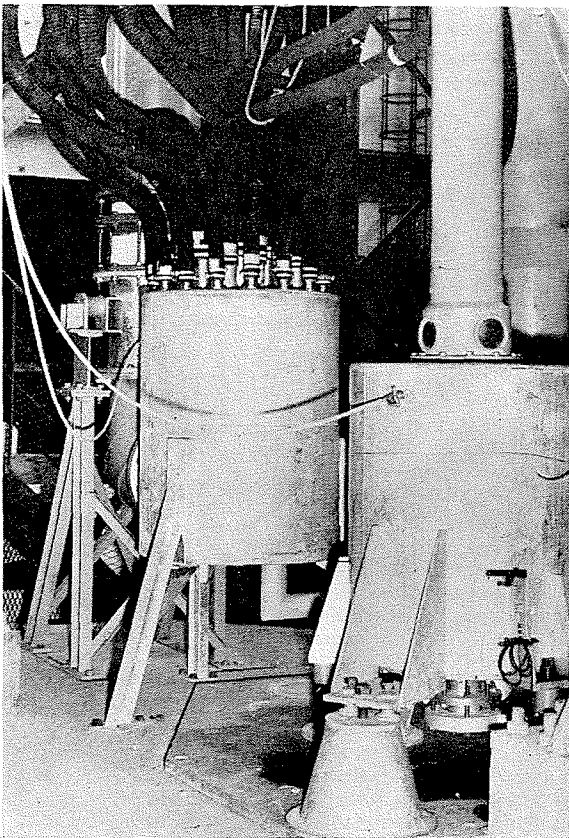
b) Mesure des accélérations et des fréquences des vibrations résultant de l'excitation hydraulique pour différentes valeurs du débit et de la force d'appui.



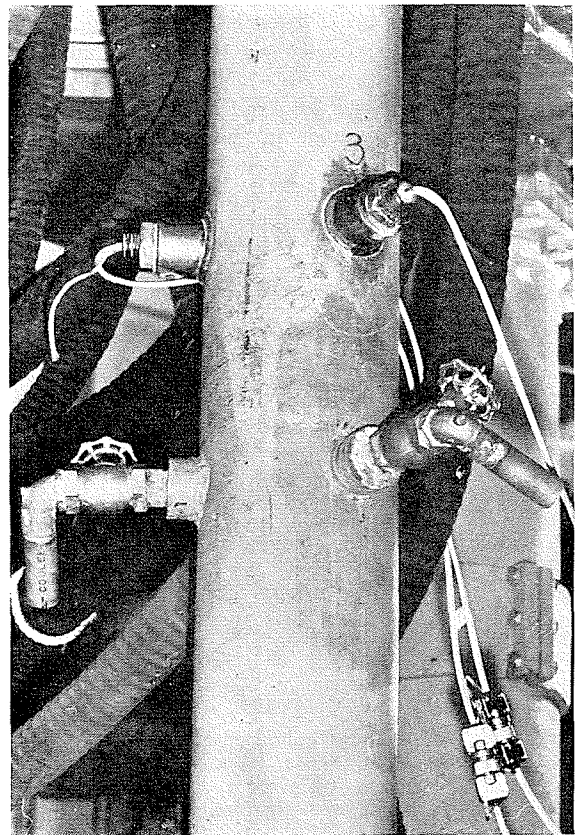
1/ Phénix. Assemblage combustible.



2/ Sortie des assemblages fictifs avec couvercle cœur.



3/ Bidon de distribution des assemblages fictifs.



4/ Tube fourreau avec contacts aux plaquettes.

L'analyse des enregistrements est en cours actuellement : les premiers résultats montrent que l'amplitude des vibrations est très faible et on peut donc penser qu'il n'y a pas de risques importants pour les assemblages de Phenix.

Etude des vibrations des aiguilles

Chaque aiguille est entourée de six autres : le fil hélicoïdal qui l'entoure peut donc théoriquement assurer un contact tous les 1/6 de pas.

En fait les tolérances de fabrication de l'aiguille, du fil et du tube hexagonal ajoutées au jeu de montage nominal peuvent donner du jeu entre chaque aiguille si l'on suppose une disposition uniforme des aiguilles.

Le choix de la méthode de mesure s'est donc porté sur la mesure de la force électromotrice résultant du déplacement dans un champ magnétique constant d'un fil conducteur enroulé autour de l'aiguille le long du fil hélicoïdal.

Cette méthode permet de mesurer directement la pulsation de la vibration et de calculer son amplitude maximale en mesurant la f.e.m. induite.

Cette méthode de mesure a été expérimentée sur un montage séparé où l'on a étudié les fréquences propres d'une aiguille en fonction de sa longueur et du type des appuis. L'utilisation d'une jauge de contrainte placée sur l'aiguille a permis de recouper les résultats obtenus par la méthode du conducteur et d'en confirmer sa validité.

Description de l'installation.

L'assemblage ne comprend que le faisceau d'aiguilles combustibles avec sa grille d'accrochage; certaines aiguilles sont munies d'un fil conducteur de 15/100 mm collé le long du fil hélicoïdal.

Le champ magnétique est produit soit par un électroaimant soit par un aimant permanent reposant sur un support lié à l'assemblage et qui peut coulisser le long de celui-ci afin de permettre des mesures à différents niveaux : l'aimant (ou électroaimant) peut prendre deux posi-

tions (l'une sur plats de l'hexagone, l'autre sur angles) afin de pouvoir déterminer les deux composantes perpendiculaires de la vibration.

Les essais et leur résultat.

Les essais ont comporté tout d'abord la mesure de la fréquence propre d'une aiguille puis l'étude de différents types de faisceaux dont celui de Phenix. De façon générale, les résultats sont parfois difficiles à interpréter tels quels car le signal est très perturbé; un dépouillement par une méthode d'auto-corrélation doit permettre de préciser les fréquences de vibrations éventuelles. On a pu constater cependant que dans le cas de Phenix les aiguilles ne sont soumises à aucune vibration mesurable.

Conclusions et programmes futurs

Les essais réalisés jusqu'ici semblent bien montrer tant pour les aiguilles que pour les assemblages que les solutions actuellement retenues pour Phenix ne présentent pas de risques majeurs de vibrations. Ce résultat intéressant pour Phenix, ne permet pas cependant de préjuger de la réponse pour d'autres réacteurs ou pour les cœurs ultérieurs de Phenix. Il importe en particulier de connaître l'influence sur les vibrations des paramètres qui peuvent intéresser le projecteur pour le dessin des différents composants.

En ce qui concerne les assemblages on compte examiner les conséquences de modifications telles que distance du couvercle cœur au-dessus des assemblages, formes des sorties d'assemblages, etc.

En ce qui concerne les aiguilles, on envisage une étude plus fondamentale dont le but est d'obtenir des corrélations entre les amplitudes ou les fréquences des vibrations et les paramètres tels que vitesse d'écoulement, type d'appuis, longueur d'aiguille, diamètre du fil hélicoïdal, pas du réseau triangulaire afin de pouvoir généraliser les résultats au cas d'un faisceau quelconque.

Discussion

Président : M. VENDRYES

M. le Président remercie M. GINIER de son fort intéressant exposé et ouvre la discussion.

M. BOULOT pose les deux questions ci-après :

1° Avez-vous déterminé d'autres fréquences propres que la fréquence fondamentale ?

2° Les fréquences relevées sur les signaux donnés par les accéléromètres varient-elles avec le débit ?

Nous n'avons pas déterminé les fréquences des modes supérieurs au fondamental, répond M. GINIER. D'autre part, nous n'avons pas constaté de modifications de fréquence avec les variations de débit mais seulement des variations d'amplitude.

Est-il indispensable de placer les « plaquettes » à mi-hauteur des assemblages combustibles, demande M. GALLO.

Cette question, répond M. GINIER, mériterait à elle seule une longue discussion. Pour Phénix, initialement — ainsi que vous l'avez peut être remarqué sur les diapositives — les plaquettes étaient disposées dans le plan médian du « cœur »; par suite du « gonflement » de l'acier sous irradiation, qui est le plus important à ce

niveau, ces plaquettes ont été reportées au niveau supérieur du faisceau combustible, dans une zone où le flux est moindre. Donc, les plaquettes sont maintenant dans la partie supérieure de l'assemblage mais non complètement au sommet, ainsi que le font les Américains qui utilisent un système de blocage des assemblages, dit « clamping ».

Ce blocage des assemblages au niveau supérieur est utilisé actuellement par les Américains pour maintenir les assemblages dans leur position nominale de façon que les engins de manutention puissent les retrouver facilement lors des déchargements.

Nous n'avons pas la même conception : nous préférons laisser les assemblages bouger un peu à la partie supérieure de façon à diminuer le niveau des contraintes dans le tube hexagonal.

Sur une question de M. LÉON, M. GINIER indique que l'on détermine la direction de la vibration au moyen du capteur qu'il a décrit en faisant subir à l'aimant une rotation de 60 ou 120°.

Avez-vous appliqué la formule de Burgreen pour estimer l'amplitude des vibrations des aiguilles du faisceau? Dans l'affirmative, quelles comparaisons ont pu être faites avec les résultats expérimentaux? demande M. LÉON.

Nous avons essayé d'appliquer les corrélations de Burgreen, dit M. GINIER; elles ont donné des amplitudes d'un ordre de grandeur très faible (inférieure au micron). En fait, au cours des expériences, cette amplitude était de même importance que le bruit de fond de sorte que toute comparaison des résultats « calculés » et « observés » était impossible.

M. le Président résume, comme suit, les conclusions qu'il a tirées des exposés et des discussions de cette séance :

Les communications de ce matin ont présenté un échantillonnage de toutes les études que nous consacrons à la compréhension des

phénomènes de vibrations dans les structures de Phénix. Elles montrent à la fois toute l'importance que nous attachons à ce problème et également que nous sommes assez confiants, que nous espérons l'avoir résolu. Je crois, néanmoins, qu'il ne serait pas mauvais, peut être, que dans les réunions qui seront organisées par la Société Hydrotechnique de France en 1973, par exemple, on vienne nous dire si les structures de Phénix vibrent ou non et, le cas échéant, on vienne nous expliquer pourquoi elles le font.

Il lève ensuite la séance en remerciant tous ceux qui ont contribué à l'animer.

Abstract

Phenix reactor fuel element and assembly vibration

The fuel assemblies of high-speed sodium-cooled reactors are an important component which operates under very severe conditions (temperature, sodium flow velocity, etc.).

The Phenix fuel assembly is shown in Fig. 1.

Due to fuel element or assembly clearances, vibration can be a problem, and this has necessitated a certain number of studies and tests.

The tests were carried out with water at ambient temperature on a full-size model combining mechanical structural similarity and Froude hydraulic similarity.

The main source of excitation is liable to be situated within the flow inside the assembly and underneath the core cover at the outlet.

Due to the symmetrical reactor layout, only one-sixth of the core and cover were featured on the model, together with their various flow regions (Fig. 2). The assembly under vibration test was installed inside a very rigid tube (Figs. 3 and 4) by means of which loads could be applied to the assembly plates. The tube could be set up in three different positions. The other assemblies were simulated by ordinary tubes.

Accelerometers and strain gauges were used for the measurements, with provision for recording the signals on magnetic tape and processing them, especially in order to establish the spectral density.

After measuring the natural frequencies of the assemblies in

air and water with various loads on the plates, flow tests were carried out. The recordings from these tests are now being analysed, but the first results show a very low vibration amplitude, so that there does not appear to be much danger as far as the Phenix fuel assemblies are concerned.

Fuel element vibration study.

Within the assembly the fuel elements are laid out in a triangular pattern, their spacing being established by means of a spiral wire round each element. As the contact levels were thus indefinite, the method chosen to detect vibration consisted in measuring the EMF produced by the movement of a conductor running along the spiral wire through a magnetic field. This method was tried out on a separate mock-up, which was also used to investigate the natural frequencies of a fuel element.

Tests were then carried out on various fuel element bundles, including Phenix, and it was found that the latter were not affected by any measurable vibration. The remaining results are being analysed by auto-correlation methods.

The next stage in this vibration research programme will be to establish the effects of the various parameters with which the component designer is liable to be concerned.

