

VIBRATIONAL STUDIES AND MEASUREMENTS ON THE PHENIX REACTOR

Y. TIGEOT and M. LIVOLANT

*Service des Études Mécaniques et Thermiques,
CEA-Centre d'Études Nucléaires de Saclay, F-91190 Gif-sur-Yvette, France*

SUMMARY

In the sodium cooled fast reactors of pool type, the internal shells are relatively thin. Consequently since the beginning of the Phenix Project, a special attention has been devoted to the flow induced vibration of those shells.

The main parts of the tests have been:

- Tests on models;
- Tests in air on the reactor shells with determination of the modal shapes and frequencies of the main components during the construction;
- Measurements during the hot flow tests.

The aim of these tests was to verify that the vibratory level of the different components was acceptable before the operation at full power, and for the future to check the theoretical and experimental methods used to predict and verify the vibrational levels in the sodium cooled reactors.

The main results of all the tests are presented and analysed in the paper.

1- Introduction

Dans les réacteurs rapides refroidis au sodium, du type intégré, les différentes cuves intérieures sont relativement minces. Aussi, dès le début du projet PHENIX, une attention particulière a été portée au risque de vibrations de ces coques, et tout particulièrement, aux vibrations induites par les écoulements.

Une série d'études et d'essais a donc été lancée pour s'assurer que la marche du réacteur ne serait pas perturbée par des incidents vibratoires importants comme cela s'est produit pour les réacteurs à eau pressurisée, et dans certains cas, pour les réacteurs à gaz.

Les trois principales phases de ces études ont été :

- Essais sur modèles
- Mesures des modes propres et des fréquences propres des différents composants du réacteur au cours de la construction, en l'absence de sodium, par excitation mécanique
- Mesures des vibrations au moment des essais de démarrage en fonctionnement isotherme, et ensuite à la valeur nominale

2- Essais sur modèles et mesures vibratoires en air sur le réacteur en cours de construction

Les premiers essais ont été effectués sur deux types de maquettes :

- a- des maquettes hydrauliques sans similitude mécanique permettant la mesure du champ des pressions fluctuantes induites par l'écoulement (Société Alstom-Techniques des Fluides-anciennement Sogreah à Grenoble).
- b- des maquettes en similitude mécanique permettant la détermination des modes propres (INSA Lyon et BVS Grenoble)

L'application du champ de pressions fluctuantes mesuré en a), sur les différents modes propres mesurés en b), avec les corrections nécessaires pour tenir compte de la masse ajoutée de sodium, a permis d'estimer l'écart type de l'amplitude vibratoire moyenne de la virole supérieure de cuve primaire à quelques dixièmes de millimètre [1].

Toutefois, compte tenu de la mauvaise connaissance des longueurs de corrélations des fluctuations de pression, et de la représentativité insuffisante des essais mécaniques, cette valeur a été considérée comme peu sûre, et une campagne d'essais sur le réacteur lui-même a été décidée (figure 1) .

La détermination des fréquences propres, le relevé des déformées et des coefficients de masse et d'amortissement généralisés associés, ont été effectués en air à l'aide de forces d'excitation ponctuelle aléatoire du type "bruit blanc" ou sinusoïdale, de fréquence variable [2][3]. Les relevés ont été effectués sur toutes les structures présentant des résonances inférieures à 15 Hz, et qui seront les seules pouvant être excitées éventuellement par les fluctuations de pression aléatoire dues à l'écoulement turbulent du sodium. Les principaux résultats sont présentés sur le tableau 1.

En plus des structures importantes, toutes les structures annexes ont été testées aux vibrations au cours de cette phase par des méthodes simples (choc, lâcher). A la suite de ces tests, certaines ont été raidies.

Ces résultats expérimentaux ont été confirmés par un code de calcul : REVOMODE, permettant de déterminer les fréquences propres, les masses généralisées et les déformées axiales de coques minces de révolution. Les résultats sont indiqués sur le tableau 1.

On peut constater que pour un nombre d'ondes circonférentielles donné sur la virole supérieure de cuve primaire, on obtient systématiquement deux fréquences de vibrations par l'expérience, les modes correspondants étant décalés d'un quart d'onde.

TABLEAU 1

Valeurs expérimentales			Nature et position du mode	Valeurs calculées par REVOMODE		
fréquence Hz	masse généralisée 10^3 kg	taux d'amortissement généralisé 10^{-3}		axe Nord-Sud	fréquence Hz	masse généralisée 10^3 kg
3.1 4.3	4 non mesurée	2	n=2 cuve primaire	Ventre Noeud	4.2	3.7
5.8 6.5	3.1 3.1	1.2 2	n=3 cuve primaire	Ventre Noeud	5.9	2
6	non mesurée		n=3	baffles hydrauliques	6.9	5.5
8.2	non mesurée		n=4	"	8.9	6.7
9	non mesurée		n=2	"	11	6.5
12.1 12.6	1.2 1.2	1.8 5.8	n=4 cuve primaire	Ventre Noeud	12.1	1.4
13	non mesurée		n=5	baffles hydrauliques	13.6	5.1

Ce phénomène provient du fait que les cuves étudiées ne sont pas strictement de révolution à cause des traversées d'échangeurs, de pompes, et de la rampe de chargement. Le calcul REVOMODE ne peut évidemment pas retrouver ce phénomène et la fréquence calculée se situe en général entre les deux fréquences expérimentales.

Par contre, sur les baffles et contre-baffles hydrauliques qui sont parfaitement de révolution, ce phénomène n'a pas été observé.

Pour les essais en vraie grandeur sur un site de réacteur, il est difficile de se livrer à une isolation des modes très soignée du fait du nombre limité d'excitateurs et de points de mesure, et de la nécessité de travailler rapidement. La connaissance préalable d'une bonne approximation par le calcul s'est révélée extrêmement précieuse pour mener à bien de tels essais.

3- Mesures effectuées pendant les essais isothermes (450°C)

Une instrumentation vibration a été mise en place sur les structures du bloc réacteur. Ce sont, soit des jauges de contrainte soudables fonctionnant à haute température, soit des accéléromètres piézoélectriques et des capteurs de fluctuation de pression. Tous ces capteurs fonctionnant en sodium sont sensibles aux parasites électriques induits par le secteur (50 Hz et multiples) ainsi qu'aux fréquences de glissement des moteurs asynchrones des pompes primaires et secondaires. Les signaux sont alors inexploitable sous forme brute, et il est indispensable de travailler sur les densités spectrales de puissance obtenues en temps réel, ou par traitement numérique à partir d'enregistrements dépouillés sur "Transformée de Fourier Rapide" permettant d'obtenir les fonctions de cohérence à partir des densités interspectrales.

Le mouvement de la dalle et des principaux composants fixés ou posés sur celle-ci a été mesuré par des accéléromètres ultra sensibles (Servo accéléromètres) généralement montés sur des supports triaxiaux permettant de suivre en un point les mouvements horizontaux suivant les directions radiale et tangentielle du réacteur, ainsi que suivant la direction verticale.

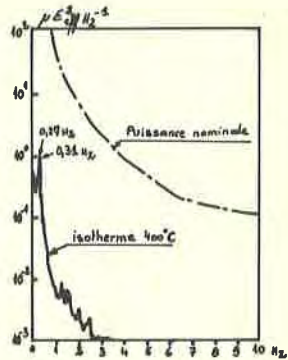
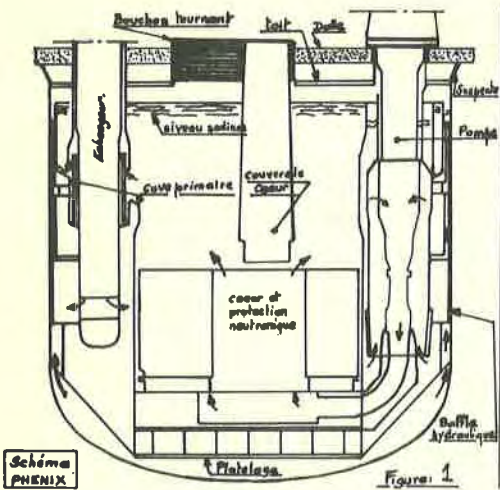
Les mesures vibratoires ont montré essentiellement la présence de deux types de phénomènes vibratoires :

- la réponse des structures à leurs fréquences propres sous l'influence des fluctuations de l'écoulement
- la présence de fréquences pulsatoires correspondant aux vitesses de rotation des pompes et à leurs multiples .

3.1 Résultats - Cuve primaire

En basse fréquence (inférieure à 10 Hz), seules les jauges d'élongation donnent des résultats utilisables. On observe une résonance très amortie (taux d'amortissement égal à 10%) pour la fréquence de 0,3 Hz. L'élongation maximale obtenue est de $0,4 \mu\epsilon_{\text{eff}}$ (écart type) au voisinage du redan. Compte tenu du nombre limité de points de mesure, il n'a pas été possible de déterminer la nature de la déformée. Le spectre de bruit autour de cette résonance varie comme l'inverse de la fréquence (figure 2) .

A plus haute fréquence, on observe sur les jauges d'élongation, les accéléromètres et les capteurs de fluctuation de pression, les harmoniques de la vitesse de rotation des pompes à des niveaux très faibles . Les déformations ne dépassent pas $0,12 \mu\epsilon$, et les déplacements absolus $3 \mu\text{m}$.



- Capteur de déformation CPMKO3
- Cuve primaire niveau redan

Figure: 2

3-2 Résultats - Structures plongeantes -Jupes de pompe

Sur une jupe, on observe des résonances à 1,7 1,95 et 7,15 Hz correspondant à celles mesurées en air. Sur le couvercle coeur apparaissent des fréquences à 7,3 8,5 et 10 Hz dont les fréquences sont liées à celles observées en air à 18 21 et 13,5 Hz.

Sur les cloches d'échangeur, on observe une résonance à 9 Hz qui correspond à la fréquence de 15 Hz mesurée en air. Les amplitudes de ces résonances sont très faibles ($0,1 \mu\epsilon$). La déformation maximale est observée sur le bras de manutention $1,3 \mu\epsilon$ au débit maximal pour la fréquence de 2,3 Hz.

Les autres résonances correspondent aux harmoniques de la vitesse de rotation.

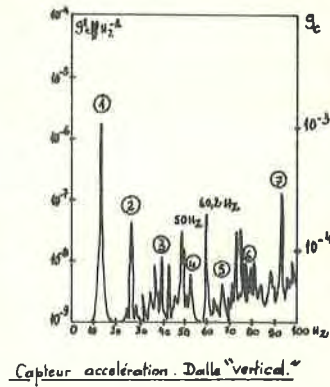
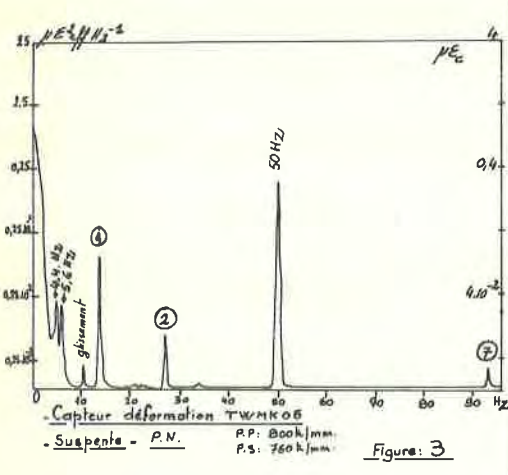
3-3 Résultats -Dalle et cuve principale

Les brides supports des trois pompes primaires et des six échangeurs intermédiaires sont posées sur la dalle avec la possibilité de translation sur celle-ci. La cuve principale est reliée à la dalle par l'intermédiaire de 21 suspentes permettant les dilatations radiales.

La raideur de ces suspentes introduit deux modes de vibration d'ensemble de la cuve principale par rapport à la dalle. On observe ces fréquences sur une jauge d'élongation soudée sur une suspente pour les valeurs 4,4 et 5,6 Hz (figure 3). On ne les observe pas sur la cuve principale .

On constate partout la présence des harmoniques de la vitesse de rotation 1-2-3 et 7 principalement (le nombre 7 correspond au nombre d'aubes du rouet des pompes). Les fonctions de cohérence entre les capteurs d'un montage tri-axial d'accéléromètres fixé sur la dalle et les autres mesures disponibles ont des valeurs supérieures à 0,6 pour ces fréquences. La présence de ces harmoni-

ques est donc due à une transmission mécanique du mouvement de la dalle à l'ensemble des structures, la dalle elle-même étant mise en mouvement par l'intermédiaire des brides d'appui des pompes primaires. L'amplitude maximale du mouvement de la dalle est observée en vertical à 13,3Hz avec une amplitude de 1mg soit 3.10^{-6} m de déplacement crête à crête (figure 4)

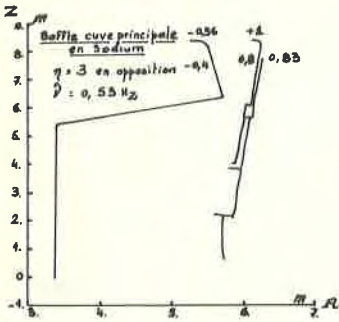


3-4 Analyse des résultats concernant la cuve primaire

Il est intéressant de comparer ces résultats expérimentaux aux fréquences et amplitudes calculées pour la cuve primaire. Avec le programme REVOMODE, on trouve en air des fréquences propres mesurées expérimentalement sur la cuve primaire et les baffles hydrauliques. Le programme AQUAMODE prenant en compte les lames de liquides entre les coques, permet la transposition des fréquences de vibration en présence de sodium et l'estimation des amplitudes vibratoires à partir des spectres de pression mesurés sur les maquettes hydrauliques. Rappelons que l'effet du fluide sur les vibrations de respiration des coques réduit la valeur des fréquences propres et introduit des couplages avec, pour un indice n caractéristique d'une vibration de respiration, l'existence de modes en phase et en opposition de phase. Les résultats obtenus, pour un amortissement supposé de 1% et une surface de corrélation de $1m^2$, sont: (figures 5-6-)

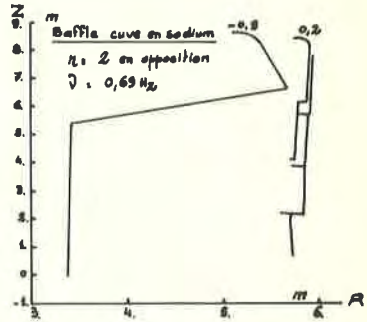
-fréquences de vibration	0,53 Hz	0,69 Hz
-amplitude de déplacement en mm	0,043	0,32
-élongation correspondante	$0,050.10^{-6}$	$1,8.10^{-6}$

La comparaison de ces valeurs avec les mesures montre que l'effet du sodium est sousestimé par le calcul: fréquence calculée la plus basse 0,53 Hz- fréquence mesurée : 0,3 Hz.



Déformée : $\delta = 0,55 \text{ Hz}$

Figure: 5



Déformée : $\delta = 0,69 \text{ Hz}$

Figure: 6

L'amplitude calculée ($1,8 \mu\epsilon$) est plus forte que l'amplitude mesurée ($0,4 \mu\epsilon$). Mais, si l'on introduit dans le calcul l'amortissement de 10% mesuré, la valeur calculée devient $0,6 \mu\epsilon$ qui est proche du résultat mesuré. Ce résultat est encourageant en ce qui concerne la validité de la méthode de prévision utilisée pour PHENIX, mais il faudrait évidemment un nombre plus important de telles mesures pour confirmer l'efficacité de cette méthode. Des études systématiques de l'amortissement en présence de fluides en mouvement apparaissent aussi nécessaires pour affiner la précision.

4- Mesures effectuées à la puissance nominale

Compte tenu de l'élévation de température, les seules mesures en sodium exploitables ont été celles obtenues à partir des jauges d'élongation, et en air celles de la dalle et de ces composants. La mise en évidence de la raie à $0,3 \text{ Hz}$ de la cuve primaire n'est plus possible car il se superpose au spectre précédent un bruit d'origine thermique variant comme l'inverse de la fréquence jusqu'à 1 Hz et ensuite comme l'inverse du carré de la fréquence, cette évolution étant analogue à celle de l'analyse spectrale des mesures de température des cuves (figure 7 -jauge à la base de la cuve primaire).

Les résultats les plus intéressants sont obtenus en puissance par l'analyse simultanée de tous les signaux vibratoires disponibles avec la mesure de la puissance neutronique utilisée actuellement pour le suivi vibratoire de PHENIX. On a ainsi confirmé l'influence du mouvement de la dalle support à la fréquence fondamentale de rotation des pompes. De même, à l'aide d'accéléromètres placés sur les carters des mécanismes de commande des barres de contrôle on a mis en évidence l'effet de la vibration d'une des barres de contrôle sur la puissance neutronique (cohérence égale à $0,72$ -figure 8).

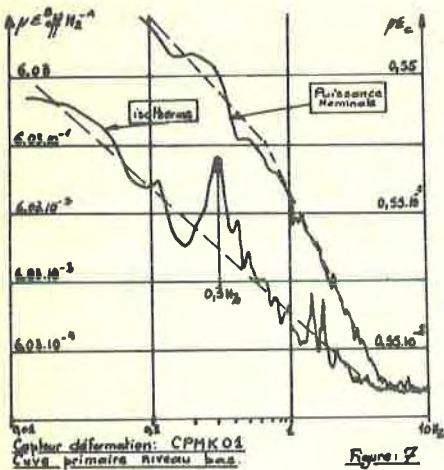
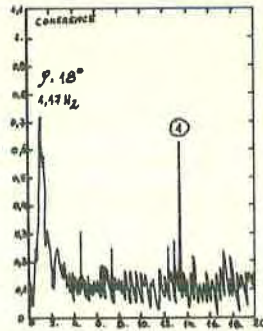


Figure 7



- Coherence barre contrôle N° 14
- Puissance neutronique et barre contrôle N° 14

Figure 8

5- Conclusions

L'ensemble de ces essais et études vibratoires a permis de vérifier que pour les principales structures de PHENIX, le niveau des vibrations mesurées était plus faible, les deux sources de vibrations principales étant l'écoulement lui-même, et les vibrations mécaniques des pompes.

La mesure des fluctuations de pression de l'écoulement sur maquette hydraulique, associée à un calcul aussi précis que possible des fréquences propres et des modes propres de vibration des coques, permet d'obtenir une bonne estimation du niveau des vibrations dues à l'écoulement. Une incertitude subsiste en ce qui concerne l'amortissement à prendre en compte.

L'estimation des vibrations dues aux pompes est plus incertaine actuellement, et pour SUPERPHENIX, un ensemble de mesures assez complètes sera effectué dans ce but.

Le test vibratoire à l'air de toutes les structures internes s'est révélé très utile: d'une part, il a permis de vérifier les résultats de calcul, et, d'autre part, de détecter les structures annexes trop souples et de les raidir.

En ce qui concerne les mesures, les meilleurs résultats ont été obtenus avec les jauges d'élongation. Les accéléromètres et les capteurs de pression piézoélectriques ont été inexploitablement aux basses fréquences du fait du bruit de fond de l'électronique.

La plus importante constatation est que les déformations mesurées sont très faibles, ce qui est rassurant pour l'avenir de la filière quant aux risques de vibrations, à condition bien entendu de continuer à prêter une grande attention à ce risque au cours du projet et de la réalisation.

Compte tenu des résultats satisfaisants obtenus, l'ensemble de ces études et essais sera vraisemblablement reconduit pour SUPERPHENIX, en tenant compte de l'expérience acquise.

REFERENCES

- [1] C.LESUEUR, D.MILAN, G.PAYAN -Etudes des vibrations aléatoires d'origine hydrodynamique de certaines structures du bloc réacteur PHENIX. Paper E4/1 First SMIRT-Nuclear Engineering and Design 18 (1972)279-303
- [2] Y.TIGEOT, G.PAYAN and J.M.GAMA- Study of vibration risks in the structures of the Reactor Block PHENIX - Paper n°526 International Symposium Vibration Problems in Industry 10-12 April 1973 Keswick, England
- [3] Y.TIGEOT, M.LIVOLANT, F.JEANPIERRE -Vibrations des structures internes de réacteurs, Comparaison, expériences, calculs. Paper E4/2 Second SMIRT Berlin 10-14 September 1973

