

ANALYSE DES PRINCIPALES INSTABILITÉS HYDRAULIQUES ET DES PROBLÈMES HYDROÉLASTIQUES DANS LES RÉACTEURS A EAU PRESSURISÉE

Programme d'étude

par

A. DAUBERT, L. PUGNET, F. BOULOT
A. WARLUZEL et A. BARROUILLET

Ingénieurs au Département Laboratoire National d'Hydraulique
E.D.F. - CHATOU

Introduction

Les graves dommages survenus aux pièces internes des réacteurs à eau pressurisée S.E.N.A. et S.E.L.N.I. montrent l'importance des problèmes hydroélastiques que pose ce genre de réacteurs. Rappelons que pour le réacteur franco-belge S.E.N.A., on a constaté la détérioration des liaisons boulonnées des deux parties de la virole du cœur et montré que l'écran thermique simplement posé sur des supports avait bougé sous l'effet de l'écoulement.

A la suite de ces incidents, les Etudes et Recherches d'E.D.F. ont décidé d'entreprendre une étude de ces problèmes en vue d'obtenir une meilleure connaissance des phénomènes mis en jeu, permettant, tout d'abord d'éviter le renouvellement de ce genre d'incidents dans les réacteurs à venir, y compris dans ceux en construction de Tihange et Fessenheim et ensuite d'en optimiser la conception.

Nature des problèmes

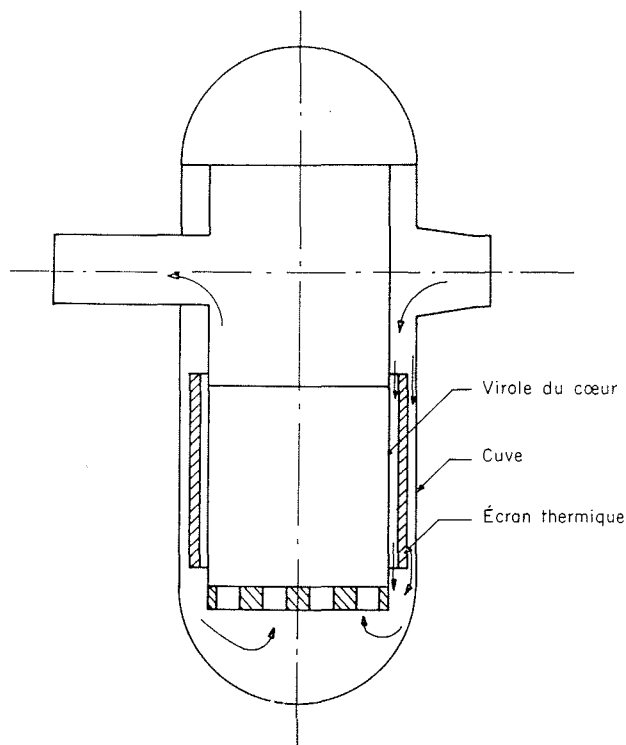
Description hydraulique d'un réacteur P.W.R.

(fig. 1).

Celui-ci est essentiellement constitué :

- d'une enveloppe cylindrique étanche, la cuve du réacteur;
- d'une virole cylindrique, enveloppe du cœur.

Dans l'espace annulaire, situé entre la cuve et la virole du cœur, se trouve une autre virole cylindrique, l'écran thermique



1/ Schéma d'un réacteur à eau pressurisée.

thermique lié mécaniquement, dans les projets actuels, à la virole du cœur. L'eau pénètre dans la cuve par des orifices débouchant dans la partie annulaire, elle descend ensuite en se partageant de part et d'autre de l'écran thermique.

L'écoulement se retourne ensuite dans le fond de la cuve et pénètre à l'intérieur du cœur, remonte et sort de la cuve par des buses qui traversent l'espace annulaire.

Ajoutons pour fixer les idées, et à titre approximatif, que les vitesses sont de l'ordre de 10 m/s dans les conduites d'arrivée et de 7-8 m/s dans la zone annulaire au régime nominal.

Nature des problèmes hydroélastiques.

L'espace annulaire compris entre la cuve du réacteur et la virole du cœur, semble être la zone principale où peuvent apparaître des forces hydrodynamiques fluctuantes. On peut en effet distinguer plusieurs causes possibles d'instabilité de l'écoulement :

- le partage du débit, venant d'une arrivée, par une paroi courbe perpendiculaire au jet, dans une géométrie très confinée;
- les sillages des buses de sortie;
- la rencontre des écoulements provenant des différentes entrées;
- le partage du débit par un obstacle (l'écran thermique) parallèle à la direction moyenne de l'écoulement dans une géométrie très confinée, les lignes de courant à l'amont de l'obstacle présentant une forte courbure et l'écran thermique faisant augmenter, de par sa présence même, les vitesses dans cette zone.

L'importance de ces instabilités est sans doute fonction du nombre de Reynolds et des différents paramètres définissant :

- la géométrie de cette zone :
- le diamètre de la virole du cœur;
- l'épaisseur de la zone annulaire;
- le nombre et la position circonférentielle des entrées et des sorties;
- le diamètre des buses d'entrée et de sortie;
- la hauteur de la zone située au-dessus des buses d'arrivée;
- l'épaisseur de l'écran thermique;
- le rayon moyen de l'écran thermique;
- la distance entre l'axe des buses d'entrée et le haut de l'écran;
- la hauteur de l'écran;
- les formes du bord d'attaque et de fuite de l'écran;
- des variations par rapport à cette géométrie :
 - l'excentrement en valeur et en direction de la virole du cœur;
 - l'excentrement en valeur et en direction de l'écran;
 - l'inclinaison sur la verticale de l'écran.

Les fluctuations de pression qui vont résulter de ces instabilités vont exciter les structures soumises à l'écoulement, essentiellement la virole du cœur et l'écran thermique qui vont répondre à cette excitation par un certain mouvement; dans la géométrie très confinée de cette zone, on peut penser que ces mouvements peuvent influencer notablement l'écoulement et ses instabilités créant ainsi un *couplage écoulement - structure*.

Différentes manières d'aborder ces problèmes

Devant ces problèmes hydroélastiques, on peut envisager plusieurs attitudes quant aux études à entreprendre.

Une première façon d'aborder le problème est la construction d'un « modèle hydroélastique » du prototype considéré, ce qui semble effectivement être la façon la plus directe d'arriver au but, qui est la connaissance de ce qui va se passer dans ce réacteur. Ceci appelle plusieurs remarques :

- tout d'abord la méconnaissance des phénomènes possibles risque d'entraîner la représentation sur le modèle d'un luxe de détails qui vont le rendre à la fois cher et difficile à exploiter;
- cette étude devra être refaite pour chaque prototype car les phénomènes de couplage peuvent avoir un caractère très aigu vis-à-vis de la variation de certains paramètres;
- il existe des problèmes de similitude dans de tels modèles qui font que la transposition des résultats du modèle au prototype pose des questions importantes;
- enfin, la technologie de tels modèles pose encore bien des problèmes, notamment du côté des conditions aux limites du modèle à prendre en compte; citons en particulier, le problème de l'influence de tout le circuit hydraulique extérieur au modèle où se trouvent des singularités (pompe, vannes, coudes, rétrécissement) génératrices de fluctuations des pressions [1].

Une seconde façon d'aborder ce genre de problème est, vu les difficultés propres à un modèle hydroélastique, de se contenter d'un modèle purement hydraulique pour déterminer les excitations (fluctuations de pression) et de se servir du calcul pour déterminer les réponses des structures [2], ce calcul pouvant être déterministe ou probabiliste suivant la nature de l'excitation [3]. Cette méthode, malgré certaines difficultés communes aux modèles hydrauliques et hydroélastiques (influence du circuit hydraulique par exemple), s'applique relativement bien dans le cas où il n'y a pas couplage entre écoulement et structure, c'est-à-dire lorsque la structure se comporte comme une simple fonction de transfert entre les fluctuations de pression (l'entrée) et l'amplitude de vibration ou de mouvement (la sortie); elle est, par contre, inapplicable dans le cas contraire.

Programme d'étude du L.N.H.

Principes.

Le L.N.H., pour la définition de son programme d'étude est parti sur quelques idées qui sont apparues dans les paragraphes précédents et qu'il n'est pas inutile de rappeler :

- l'espace annulaire, compris entre la cuve du réacteur et la virole du cœur et qui contient l'écran thermique, semble être la zone principale où peuvent apparaître des forces hydrodynamiques fluctuantes;
- des couplages entre écoulement et vibration ou mouvement de structure sont possibles;
- l'influence des paramètres intervenant dans ces instabilités d'écoulement et ces couplages, peut avoir un ca-

ractère aigu, c'est-à-dire qu'une modification faible de la valeur d'un paramètre peut entraîner des modifications importantes des résultats;

— des résultats concernant les réacteurs en construction devront pouvoir être apportés avant fin 1972.

Ceci a donc naturellement conduit à une étude expérimentale paramétrique où l'influence des différents paramètres, cités précédemment, sera examinée autour d'une valeur de référence; ce rôle de référence sera joué par un des réacteurs en construction, celui de Tihange.

Plan d'études.

Dans une première partie, on cherchera à étudier l'écoulement seul, c'est-à-dire, sinon avec une absence totale d'interaction avec les structures, du moins avec l'interaction la plus faible possible compte tenu des conditions technologiques.

On s'attachera à mettre en évidence et à quantifier les instabilités possibles et à déterminer l'influence des divers paramètres sur ces instabilités (existence de fourchettes dangereuses), en commençant par ceux sur lesquels une action est encore possible sur les réacteurs en construction.

La seconde partie concernera l'étude des couplages possibles. Dans un but d'augmentation progressive des difficultés, on placera tout d'abord dans l'écoulement une structure à un seul degré de liberté; celle-ci pourra être la virole du cœur ou l'écran thermique susceptible de pivoter autour d'un axe horizontal dont l'orientation serait modifiable (deux directions semblent *a priori* intéressantes, l'une dans l'axe d'un jet, l'autre entre deux jets), la force de rappel étant elle-même réglable de façon à pouvoir faire varier la période propre de ce montage dans une gamme en similitude avec celles des périodes propres les plus basses rencontrées dans le prototype.

Chacun des deux cas sera étudié séparément, d'abord dans la géométrie de référence, puis dans les géométries pour lesquelles l'étude de l'écoulement aura montré des instabilités possibles.

On se propose ensuite de remplacer la structure rigide figurant la virole du cœur et l'écran par des coques dont on peut considérer les divers modes propres de vibration en poutre ou en coque comme autant de degrés de liberté et d'étudier à nouveau les risques de couplage entre ces structures et l'écoulement.

Cette phase relativement difficile de l'étude, mais essentielle pour la *compréhension* et la *prévision* des phénomènes hydroélastiques dans les équipements internes des réacteurs à eau pressurisée, nous semble ne pouvoir être abordée avec des chances réelles de succès que si tout ce qui la précède a été mené à bien.

C'est à partir des résultats obtenus, qui devront faire ressortir les paramètres adimensionnels essentiels, que sera définie la similitude à respecter pour les problèmes hydroélastiques étudiés.

Dispositif expérimental.

Ces études seront effectuées sur un dispositif expérimental actuellement construit et qui, pour certaines valeurs des paramètres, représente un « modèle » à l'échelle 1/10 du réacteur de Tihange.

La cuve (l'enveloppe extérieure) du modèle est en plexi-

glas de manière à pouvoir visualiser l'écoulement et ses instabilités, ce qui semble un atout précieux dans ce genre d'étude. On dispose de plusieurs structures internes pour étudier l'influence des géométries de ces pièces.

Le circuit hydraulique extérieur au modèle est tel qu'on peut dépasser de 10 % dans le modèle la vitesse nominale du réacteur de référence (on a alors une distorsion de 1/67 sur le nombre de Reynolds), ce qui est intéressant à remarquer puisque, dans ce genre de problème hydroélastique et dans le cas où le modèle est fait du même matériau que celui utilisé dans le prototype et en similitude géométrique, la condition de similitude généralement admise est la conservation des vitesses.

Des mesures de grandeurs fluctuantes peuvent être faites :

- de pression avec des capteurs piézométriques;
- de vitesse avec une sonde à film chaud;
- de déplacement des structures en mouvement avec des accéléromètres.

Le traitement de ces mesures est fait par analyse spectrale (fonctions de corrélation, spectre direct et croisé) quand elles ont un caractère complexe ou aléatoire.

Si ce dispositif expérimental, dit modèle au 1/10^e ne permet pas de se faire une idée claire sur certains paramètres adimensionnels jugés importants, un autre modèle, au 1/4, sera construit.

Conclusions

Cette étude, telle qu'elle vient d'être définie, peut paraître très vaste; c'est qu'il nous paraît utile de comprendre les phénomènes à la fois dans des buts scientifique et technologique, ne serait-ce que pour pouvoir interpréter valablement et avec sûreté des essais plus technologiques, comme ceux qui ont été évoqués au troisième paragraphe. Ajoutons, et c'est important, que des résultats immédiatement utilisables pour les réacteurs en construction seront obtenus.

Notons encore qu'en cours d'études, certains problèmes concernant la méthodologie (similitude en particulier) et la technologie des modèles hydroélastiques seront abordés et que toute méthode ou résultat acquis à ce sujet sont susceptibles de nombreuses applications dans le domaine de la tenue mécanique des structures industrielles.

Références

- [1] FORTIER (A.). — Ecoulements instationnaires dans les conduites, 13^e Congrès de l'A.I.R.H., Kyoto (1969).
- HENRY (R.). — Identification par intercorrélation de phénomènes d'écoulements instationnaires dus aux pertes de charges singulières dans les conduites, C.R.A.S., Paris, t. 270 (27 avril 1970).
- [2] LAMBERT, LÉON. — Détermination expérimentale des forces hydrodynamiques fluctuantes dans les cuves du réacteur Phénix, Comité Technique, S.H.F. (mars 1971).
- LEVIN, MILAN, PAYAN. — Recherches sur la réponse de coques cylindriques à des excitations hydrodynamiques, Comité Technique, S.H.F. (mars 1971).
- [3] LIN (Y.K.). — Probabilistic theory of structural dynamics, *Mc Graw-Hill* (1967).
- THOMSON (W.T.). — Vibration theory and applications, *Prentice Hall* (1965).

M. le Président remercie M. DAUBERT pour son intéressante communication et le félicite de n'avoir pas hésité à présenter les premiers résultats d'une étude très importante. Il note que, dans la première phase de celle-ci, la priorité a été donnée à l'approche expérimentale, compte tenu des problèmes posés par les centrales nucléaires de la S.E.N.A. et de la S.E.N.I.

M. EVENEPOEL (A.C.E.C., Département Etudes et Recherches de la Division nucléaire) intervient en ces termes :

Nous avons entrepris, aux A.C.E.C., un programme qui répond à des soucis concordant avec ceux de M. DAUBERT, mais dans une optique un peu différente puisque nous sommes des Constructeurs et, de ce fait, moins « hydrauliciens » mais plus « mécaniciens ».

Notre programme qui coûte environ dix millions de francs est financé par le Gouvernement belge. Il intéresse spécialement, à court terme, nos deux réacteurs de Doel, mais s'inscrit dans une optique plus large.

Nous avons réalisé — ainsi qu'un des conférenciers l'a évoqué ce matin — un modèle complet du réacteur de Doel : nous avons reproduit toutes les structures et toutes les attaches à l'échelle de 1/6. Nous avons tenu à reproduire toutes les structures parce que s'agissant de phénomènes hydroélastiques, nous pensons qu'il est fondamental de reproduire les fréquences à l'inverse de l'échelle géométrique.

Nous avons adopté comme règle de reproduire la vitesse qui existe dans la réalité. Donc, le modèle est au 1/6, mais la vitesse de l'eau est la vitesse réelle dans le prototype.

Cependant, nous ne reproduisons pas le nombre de Reynolds. Pour nous assurer que cela ne conduit pas à des erreurs, nous faisons varier la vitesse dans des proportions importantes et nous reproduisons des débits qui correspondent à deux fois le débit réel.

Comme notre but est de dessiner un réacteur « qui tient » et comme il nous est apparu que l'approche par des mesures hydrauliques, n'était pas « cohérente » avec les délais qui nous étaient imposés, nous nous sommes plutôt orientés dans une première phase vers des mesures de contrainte, de déplacement et de fréquence de la structure elle-même, en nous disant que s'il y avait de gros décollements, s'il se produisait des choses fâcheuses dans l'écoulement (comme M. DAUBERT a montré qu'il peut s'en produire), tant que la structure se comporte bien, on peut remettre à plus tard l'examen de ces problèmes.

Actuellement, le programme est en cours et est loin d'être terminé; mais nous avons déjà certaines indications intéressantes.

En particulier, nous avons trouvé qu'avec le dessin actuel des pièces (avec la correction des erreurs qui existaient dans les réacteurs de la génération S.E.N.I.-S.E.N.A.) la réponse de la structure était satisfaisante et assez indépendante des phénomènes dus au débit. Par contre, le fait que la structure se trouve dans l'eau a beaucoup d'importance.

Nous calculons en premier lieu les fréquences de la structure du réacteur, y compris les « assemblages combustibles », dans l'air pour chaque configuration que nous étudions; nous mesurons ensuite les fréquences dans l'air d'abord, puis dans l'eau, d'abord en l'absence de débit en excitant la structure avec un shaker.

Nous nous sommes rendu compte qu'avec le dessin actuel de nos réacteurs — qui sont des réacteurs du type Westinghouse — le phénomène le plus dangereux en ce qui concerne en tout cas l'écran thermique semble être la possibilité de résonance entre l'excitation forcée due aux pompes du circuit primaire et les fréquences propres de la structure. Cela paraît beaucoup plus dangereux que les phénomènes dus à l'écoulement.

Ce danger est réel du fait que, suivant les centrales, on adopte des pompes de circuit primaire de vitesses différentes puisqu'aux Etats-Unis on a un réseau à soixante périodes et en Europe un réseau à cinquante périodes. Certains constructeurs fournissent des pompes de circuit primaire tournant à 1.000 tr/mn, d'autres à 1.500 tr/mn. Donc, on ne peut pas déduire du fait qu'une structure s'est bien comportée avec des pompes de circuit primaire qui ont une fréquence fondamentale donnée que la même structure se trouvant en présence de pompes de circuit primaire ayant une autre fréquence fondamentale se comportera tout aussi bien.

Donc, dans notre étude sur modèle, nous mesurons les fréquences pour différentes configurations, dans l'air, et nous les comparons au calcul. On mesure le rapport des fréquences pour les mêmes modes et les mêmes types de vibrations dans l'air et dans l'eau : par les équations de Navier-Stokes, on peut prédéterminer ce rapport.

Malheureusement, les équations de Navier-Stokes conduisent vite à des développements complexes. Alors que pour le calcul des fréquences dans l'air, on peut tenir compte de toute la structure et des assemblages de combustible, pour le calcul des fréquences dans l'eau, au stade actuel des choses — en tout cas, chez nous — nous sommes obligés de faire beaucoup de simplifications.

Jusqu'à présent, nos mesures sur modèle indiquent que les grosses simplifications que nous faisons dans la géométrie du réacteur pour l'application des équations de Navier-Stokes paraissent valables.

Plus tard, nous rejoindrons le programme de M. DAUBERT en faisant des mesures hydrauliques; mais les dimensions de notre modèle sont tellement petites que nous n'osons pas « l'instrumenter » trop fort, parce que très rapidement, l'instrumentation modifie les inerties.

Un réacteur au 1/6 mesure 1,50 à 2 m de haut, et moins d'un mètre de diamètre. Le volume de l'instrumentation que nous pouvons mettre dans une campagne d'essais déterminée est limité à la fois par la place disponible et par les phénomènes d'inertie.

Mais nous sommes persuadés que la conclusion de nos essais ira au-delà du réacteur de Chooz et que nous pourrions anticiper dans la prévision des phénomènes vibratoires d'écran thermique ou de tube-guide, ou d'autres problèmes de vibrations. Par une approche comparable à celle suivie pour les réacteurs à gaz (dans laquelle on développe en parallèle les méthodes de calcul et les méthodes expérimentales), nous arriverons à des méthodes de calcul qui pourront très bien prédire le comportement vibratoire de nos réacteurs dans l'eau.

M. le Président remercie vivement M. EVENEPOEL de son intéressante communication. Il semble, dit-il, que dans votre interprétation des résultats donnés par votre ingénieux modèle vous insistiez plutôt sur les phénomènes liés à la vitesse des pompes qu'aux instabilités dues à l'écoulement lui-même. Qu'en pense M. DAUBERT ?

Les pompes sont des sources d'excitation certaines, explique M. DAUBERT. Elles sont même les premières auxquelles on pense en général. S'il est facile d'en connaître les fréquences a priori, par contre, il est beaucoup moins aisé de prédire le niveau des excitations qu'elles peuvent engendrer dans le circuit hydraulique. On comprend alors facilement la stratégie suivie en général par les projeteurs en face de ce problème. On évite simplement que les structures puissent avoir des fréquences propres voisines des fréquences d'excitation des pompes. On est donc simplement ramené à une étude de vibration de la structure. En général, on tient compte de la présence de l'eau, mais pas de l'écoulement. Et à ce stade, où les excitations hydrodynamiques liées aux instabilités de l'écoulement ne sont pas en cause, il n'est pas nécessaire de faire une étude à proprement parler hydroélastique, tout au moins au sens défini par M. le Professeur FORTIER. Et comme l'a dit M. EVENEPOEL, il est actuellement possible de déterminer par le calcul l'influence de la présence de l'eau stagnante sur les fréquences propres des structures. Au L.N.H., nous avons développé plusieurs programmes de calcul de ce genre pour des coques cylindriques et des plaques. Dans ces phénomènes, l'eau n'intervient que par son inertie à répondre aux mouvements que lui impose la coque et il ne nous semble pas que les équations de Navier-Stokes soient nécessaires, mais que les écoulements irrotationnels sont suffisants pour l'étude de ces fréquences propres.

Pour revenir au problème des pompes, il faut ajouter que les modèles hydroélastiques comportent, en général, eux-mêmes au moins une pompe, mais dont le rôle excitateur sur le modèle n'est absolument pas représentatif de celui de la pompe dans l'installation prototype. Cette pompe sur le modèle et toute la tuyauterie annexe et nécessaire pour l'alimenter, créent des conditions hydroélastiques aux limites du modèle qui ne sont pas en général représentatives et qui se manifestent dans la plupart des cas par un bruit de fond, en général de nature acoustique, qui peut masquer entièrement les phénomènes étudiés. C'est là, la principale difficulté de ces études expérimentales hydroélastiques.

M. LIVOLANT s'étonne que l'on parle de fréquences acoustiques à propos de modèles ayant les dimensions indiquées et compte tenu du fait que la vitesse du son dans l'eau est de l'ordre de 1.500 m/s.

D'un échange de vues avec M. DAUBERT sur ce point, il semble résulter que, dans ce domaine, la méthodologie n'est pas encore au point et que l'influence de « l'environnement » du modèle est importante.

Personne ne demandant la parole, M. le Président lève la séance en remerciant chaleureusement tous ceux qui l'ont animée.