

AVIS DE SOUTENANCE DE THESE

Madame Xiaoshu MA est autoriséé à présenter ses travaux en vue de l'obtention du diplôme national de DOCTORAT délivré par l'école CENTRALE MARSEILLE

Le 1^{er} juin 2022, à 14H00

Lieu : Amphithéâtre du Château de Cadarache,
Château de Cadarache, 13115 Saint Paul Les Durance

Titre : : Comportement dynamique sous écoulement fluide de faisceaux d'aiguilles de combustible à fil espaceur et méthode de dimensionnement associée

École doctorale : **ED 353 Sciences pour l'ingénieur : mécanique, physique, micro et nanoélectronique**

Spécialité : **Mécanique des Solides**

Rapporteurs

Monsieur Vincent ACARY, Directeur de recherche, INRIA Grenoble, France.

Monsieur Jean - Marc CADOU, Maître de conférences, université Bretagne Sud, France.

Membres du Jury

Monsieur Vincent ACARY, Directeur de recherche, INRIA Grenoble, France.

Monsieur Jean - Marc CADOU, Maître de conférences, université Bretagne Sud, France.

Madame Soizic TERRIEN, Chargée de recherche, université le Mans, France.

Monsieur Georges JACQUET-RICHARDET, Professeur, INSA Lyon, France.

Monsieur Jean -Marie GATT, Directeur de recherche, CEA Cadarache, France.

Monsieur Guillaume RICCIARDI, Directeur de recherche, CEA Cadarache, France.

Monsieur Bruno COCHELIN, Professeur, Ecole Centrale de Marseille, France.

Monsieur Stéphane BOURGEOIS, Maître de conférences, Ecole Centrale de Marseille, France.

Résumé (FR)

La compréhension du comportement dynamique des aiguilles combustibles soumises à un chargement sismique est une des préoccupations majeures pour la conception des RNR (Réacteurs à Neutrons Rapides) et notamment pour la conception du prototype ASTRID. Dans ce domaine, deux aspects physiques sont importants : la forte non-linéarité due aux contacts (entre les aiguilles combustibles et entre les aiguilles et le tube hexagonal) et l'interaction fluide-structure avec le caloporteur.

Ces phénomènes sont pris en compte en utilisant le modèle de la force fluide-élastique proposé par Paidoussis et une loi de contact par pénalisation. Plusieurs paramètres associés à ces modèles sont à déterminer

expérimentalement en utilisant la méthode d'analyse modale. A cet effet, un banc d'essai CARNEAU équipé d'une caméra rapide a été conçu pour visualiser la vibration des aiguilles sous écoulement d'eau à différentes vitesses et sous sollicitation dynamique de type balayage sinusoïdal. Malheureusement, les essais visagés n'ont pas pu être réalisés dans le cadre de ce travail.

En utilisant les paramètres déterminés dans la littérature (expérimentalement ou bien par des approches théoriques), le modèle numérique développé dans ce travail a pu être exploité en mettant en œuvre deux méthodes : la méthode traditionnelle en utilisant l'intégration de Newmark implicite et la méthode GPTI (global periodic time integration). Ces modélisations nous permettent d'avoir une analyse phénoménologique de la dynamique non linéaire des aiguilles combustible : la vibration globale, qui reste relativement simple, et les vibrations parasites liées aux contacts se produisant sur des échelles de temps beaucoup plus petites, d'où la complexité du comportement dynamique. Les deux méthodes ont leurs propres avantages et limites pour les problèmes de contacts. La première méthode est assez directe et utilisable avec n'importe quelle rigidité de contact, mais des difficultés apparaissent pour obtenir les régimes coexistants sensibles aux conditions initiales choisies et générés par la non-linéarité. La méthode GPIT permet de déployer une branche de solution pour un paramètre variable (fréquence, amplitude de la sollicitation, ...) et chaque point solution correspond à un régime de vibration. Cependant la difficulté induite par la continuation conduit à une plage limitée de la raideur de contact et de l'amplitude de sollicitation. Avec l'augmentation de l'amplitude, de plus en plus de branches de réponses périodiques coexistent pour la dynamique de l'aiguille et présentent une grande complexité pour l'analyse. Par ailleurs, la méthode GPIT ne garantit pas l'observation de toutes les branches, et donc la méthode d'intégration directe peut être une solution complémentaire mais ne permet pas de trouver toutes les solutions correspondantes aux comportements dynamiques des aiguilles.

La prise en compte du couplage fluide structure est aussi un élément essentiel à la bonne modélisation du système. Les effets du fluide sur la structure ont bien été pris en compte dans le cadre du modèle précédent. Pour aller plus loin, une prise en compte des effets de la structure sur l'écoulement est nécessaire. Pour cela, une approche par moyenne spatiale, sur chaque Volume Élémentaire Représentative dépendante de l'espace et du temps, a été proposée. Elle permet d'établir les équations du mouvement du fluide en moyennant l'équation de Navier-Stokes sous une forme ALE (Arbitrary Lagrangian Eulerian). Le couplage avec la structure est pris en compte en utilisant le modèle hydraulique de Paidoussis.

Mots clés : dynamique des structures, interaction fluide-structure, contact, Newmark implicite, continuation asymptotique numérique, solutions periodiques globales

Abstract (EN)

Understanding the dynamic behavior of fuel pins subjected to seismic loading is one of the major concerns for the design of SFRs (Sodium-cooled Fast Reactors) and in particular for the design of the ASTRID prototype. In this field, two physical aspects are important: the strong non-linearity due to the contacts (between the fuel pins and between the pins and the wrapper tube) and the fluid-structure interaction with the coolant.

These phenomena are taken into consideration with the fluid-elastic force model proposed by Paidoussis and a penetration impact law. Several parameters engaged with these models are to be determined with experiments. To this end, a test bench CARNEAU equipped with a fast camera as measurement is designed to capture the motion history of the fuel pins in water flow of different velocities and under sine sweep excitation. It is anticipated to identify the global parameters lumping the effects of the detailed physics with modal analysis, unfortunately the experiments were not carried out.

With the parameters decided with the inspiration from the previous experiments and theoretic works, two numeric methods have been used to exploit the model: the traditional method using implicit Newmark integration and the global periodic time integration (GPTI) method. The modelling enables us to have a phenomenal analysis on the nonlinear dynamics of the fuel pins: the relatively simple global vibration and the local impact-related chatters of

much smaller time scale, which is the origin of the complexity of the dynamic behavior. The two methods have both their advantages and limits with the impact-related problem. The direct time-integration is quite direct and can be applied for any contact rigidity, but it is difficult to cover the coexisting regimes led by the nonlinearity as it is sensible to the initial condition. The GPTI method allows to unfold the solution branch for a varying parameter and each solution point corresponds to a vibration regime, but the difficulty with the continuation leads to a limited range of contact stiffness and excitation amplitude. With an increasing amplitude, more and more solution branches coexist for the periodic dynamic responses of the fuel pin resulting in a great complexity, the GPTI method does not neither guarantee the observation of all the possible periodic solutions, the direct time-integration can be complementary but not exhaustive.

The fluid-structure coupling is also an essential element for the correct modeling of the system. The effects of the fluid on the structure have been taken into account in the previous model. To go further, it is necessary to take into account the effects of the structure on the flow. To this end, a spatial averaging method considering the space- and-time dependent RVEs has been proposed. It makes it possible to establish the equations of motion of the fluid by averaging the Navier Stokes equation in the form of Arbitrary Lagrangian Eulerian (ALE). The coupling with the structure is accounted for by using the hydraulic model of Paidoussis.

Keywords: structure dynamics, fluid-structure interaction, contact, implicit Newmark integration, asymptotic numerical continuation, global periodic solutions

