

Avancées pour l'inspection non destructive par des méthodes ultrasonores des réacteurs refroidis au sodium liquide

J. Moysan^a, N. Massacret^b, M.-A. Ploix^a, J.-P. Jeannot^b et G. Corneloup^a

^aAix Marseille Université, LMA UPR CNRS 7051, Avenue Gaston Berger, 13625 Aix En Provence, France

^bCEA, CEN Cadarache, DTN/STPA/LIET, 13108 Saint-Paul-Lez-Durance, France
joseph.moysan@univ-amu.fr

Le développement des systèmes nucléaires de nouvelle génération nécessite de prévoir des avancées dans les méthodes de contrôle non destructif. Dans le cas des réacteurs à caloporteur sodium les avancées dépendent d'une meilleure connaissance des propriétés du milieu complexe que représente un écoulement de sodium liquide turbulent. Lorsque des méthodes ultrasonores sont envisagées, il est nécessaire de développer des modèles de propagation adaptés à ce milieu. Le caloporteur présente, selon les situations de fonctionnement, des gradients de température, des gradients de vitesses et des taux d'engagement qui tous influent sur la propagation des ondes ultrasonores. Nous présentons ici une modélisation du milieu au-dessus du cœur du réacteur. Un code rayon nommé AcRaLis a été développé pour prévoir la propagation des ondes tant du point de vue des trajets que de l'amplitude. Des comparaisons sont faites avec des expériences dédiées où les paramètres du milieu (température et écoulement) sont analysés séparément.

1 Introduction

Les réacteurs rapides refroidis au sodium ont été choisis par la France comme option de référence pour être les réacteurs de génération IV. Ces réacteurs doivent atteindre les objectifs du forum Génération IV en termes de développement durable, de compétitivité économique, de fiabilité, de résistance à la prolifération et de protection des personnes [1].

Le CEA (Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives), EDF (Electricité de France) et AREVA ont créé un partenariat pour coordonner leurs programmes de recherche et concevoir un prototype de réacteur nucléaire de quatrième génération.

Parmi les nombreux développements requis pour atteindre le standard industriel, les trois partenaires ont lancé un programme de recherche nommé ISIR (In-Service Inspection and Repair) [2]. Ce programme de recherche a pour objectif de prendre en compte la configuration de ce nouveau réacteur et les caractéristiques du caloporteur afin de développer une instrumentation adaptée à l'inspection des différents éléments de la cuve du réacteur. Le sodium en effet, est un métal liquide opaque, interdisant l'utilisation des méthodes optiques classiques. Ainsi diverses techniques d'instrumentation liées à l'utilisation du sodium sont étudiées dans ce programme, comme la détection des bulles dans le sodium [3], la transmission des ultrasons au travers d'interfaces [4][5] ou la thermométrie acoustique [6]. La thermométrie acoustique consiste à mesurer des températures par ultrasons selon différentes solutions qui toutes reposent sur la dépendance de la célérité des ultrasons à la température du milieu. Il s'agit d'une méthode alternative à la mesure de la température par thermocouples. Cette méthode a notamment pour avantage un temps de réponse très bref améliorant ainsi la surveillance du fonctionnement du réacteur.

Nous prévoyons de développer une méthode consistant à propager une onde ultrasonore jusqu'à deux interfaces générant des échos et séparées par une distance connue. Afin de pouvoir anticiper et maîtriser les difficultés liées à un milieu de propagation encore mal connu, une étude du milieu a été menée et un modèle de propagation des ultrasons, approprié à ce milieu et à cette instrumentation, a été choisi pour simuler le parcours des ultrasons. Nous présentons des simulations illustrant le potentiel de ces développements pour la thermométrie acoustique en cœur de réacteur.

2 Contexte de l'étude

Leibowitz et al. [7] ont établi une relation (1) entre la célérité et la température dans le sodium :

$$C_{us}=2577,3 - 0,536 \cdot T \quad (1)$$

Où C_{us} est la célérité des ultrasons en mètres par secondes et T la température du sodium en degrés Celsius

Pour une application en réacteur, les bords des têtes d'assemblages de combustibles sont de bons candidats pour générer les échos. Il serait alors possible de mesurer la température du sodium directement à la sortie des assemblages. Un exemple de configuration expérimentale est présenté dans la figure 1 sur un projet de cœur de réacteur ASTRID.

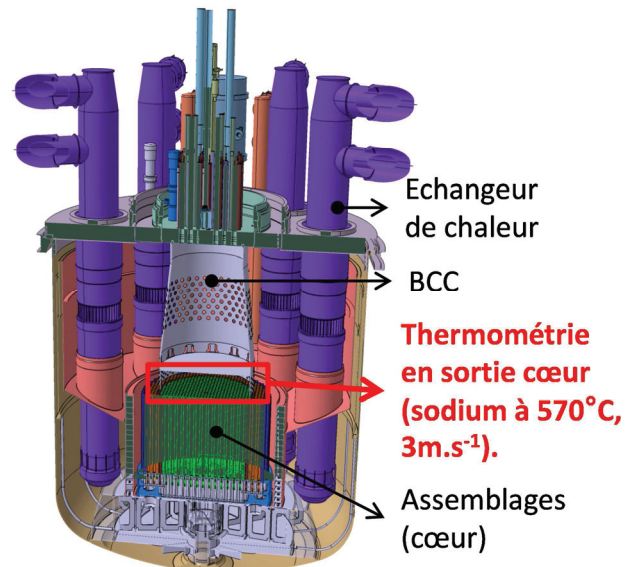


Figure 1. Positionnement de la zone de mesure.

Cette méthode a fait l'objet d'un brevet par l'UKAEA (United Kingdom Atomic Energy Authority) en 1985 [8]. Il est possible d'avoir une excellente dynamique de mesure : la célérité des ultrasons étant de l'ordre de 2300 m.s^{-1} dans du sodium à 550°C , le temps de réponse est principalement dû au temps de traitement du signal. De plus en visant une rangée d'assemblages en incidence rasante, des expérimentations en eau ont montré qu'il serait possible de mesurer la température du fluide sortant de six assemblages simultanément [9], ce qui réduirait considérablement le volume de l'instrumentation au-dessus du cœur.

Cependant les conditions thermo-hydrauliques au-dessus du cœur peuvent perturber la propagation des ondes ultrasonores entre le transducteur ultrasonore et les têtes d'assemblage (en termes de retard temporel et de déviation). En fonctionnement normal, la différence maximale de température entre deux assemblages voisins peut être de 50°C . De plus le sodium sortant des inter-assemblages est plus froid (de plusieurs dizaines de degrés Celsius) que le sodium sortant des assemblages, et certains

espaces laissés libres pour le passage des barres de contrôles ou de sûretés forment aussi des zones de température de cet ordre. C'est donc dans un milieu très inhomogène en température que les ultrasons vont se propager. En outre au-dessus du cœur l'écoulement est turbulent, avec des vitesses locales allant jusqu'à environ $3\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$, et des gradients de vitesse de l'ordre de plusieurs mètres par seconde par centimètre. Ce champ turbulent peut aussi avoir des conséquences sur la propagation des ultrasons et entraîner des erreurs sur la mesure acoustique de la température comme c'est le cas pour les mesures ultrasonores de débit [10].

3 Modélisation du milieu

3.1 Caractéristiques thermo-hydrauliques du sodium

Les caractéristiques thermo-hydrauliques d'un milieu sont importantes à prendre en compte pour choisir un modèle de propagation ultrasonore adapté et efficace. Certains codes ont été développés pour des milieux fortement turbulents où les nombres de Mach sont proches de l'unité, grâce à l'utilisation de méthodes d'approximation parabolique de différents degrés [11].

L'écoulement de sodium au-dessus du cœur d'un SFR n'est pas suffisamment rapide en comparaison de la célérité des ultrasons pour justifier l'utilisation de ces codes. Dans le cas de cette étude, où le nombre de Mach est de l'ordre 0,001 il est en effet possible d'utiliser l'hypothèse des fluides gelés, qui permet de considérer que les conditions thermo-hydrauliques du milieu sont stationnaires lors de la propagation d'une onde ultrasonore. Cette approximation est notamment utilisée pour des études ultrasonores des turbulences en milieu fluide [12].

Un autre paramètre important est le rapport entre la taille caractéristique des inhomogénéités du milieu et la longueur d'onde des ultrasons. La taille des inhomogénéités thermiques dépend principalement de la conductivité thermique du sodium. Celui-ci est un métal liquide, son nombre de Prandtl est donc très petit, de l'ordre de 10^{-3} . Le nombre de Prandtl est le rapport entre la viscosité cinématique et la diffusivité thermique. Il permet de déterminer si le champ de température d'un fluide sera fortement influencé par son champ des vitesses (nombre de Prandtl élevée), ou faiblement (nombre de Prandtl faible), et sa conductivité thermique est grande ; les petites inhomogénéités thermiques vont donc rapidement disparaître dans ce milieu [13]. Plusieurs expériences ont été réalisées en sodium [14] et il apparaît que la taille caractéristique des inhomogénéités thermiques est plus grande que 2 centimètres. La célérité d'une onde ultrasonore de 2,25 MHz se propageant dans du sodium à 550°C étant de l'ordre de $2300\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$, sa longueur d'onde est de l'ordre du millimètre. Il est donc possible d'émettre l'hypothèse des ondes de hautes fréquences [15] :

$$\lambda \ll L \text{ et } \sqrt{\lambda X} \ll L \quad (2)$$

Où λ est la longueur d'onde des ultrasons, L la taille caractéristique des inhomogénéités thermique, et X la longueur du chemin parcouru par les ultrasons dans le fluide.

Sous ces deux hypothèses, le modèle du rayon acoustique basé sur la théorie de l'acoustique géométrique est à privilégier.

3.2 Milieux modélisés

Il n'existe pas encore de jeux de données très représentatifs des conditions thermo-hydrauliques en cœur de réacteur à une échelle compatible avec la finesse requise pour prévoir les simulations de propagation d'ondes ultrasonores. L'expérience PLAJEST de la Japan Atomic Energy Agency (JAEA) [16] a permis d'avoir quelques éléments d'informations sur les gradients de températures dans les jets de sodium chauds [17]. En extrapolant ces données au cas d'un cœur de SFR deux cas simples sont modélisés pour étudier séparément l'influence de la température d'une part, et de l'écoulement d'autre part. Le milieu est le sodium liquide juste au-dessus des têtes d'assemblage.

Lors d'une mesure acoustique de la température du sodium à la sortie d'un assemblage, une onde ultrasonore est propagée au-dessus du cœur jusqu'à se réfléchir sur les bords de l'assemblage. Cette onde rencontre successivement des zones chaudes (créées par le sodium sortant des assemblages) et des zones froides (créées par le sodium sortant des inter-assemblages). Suivant la direction de propagation de l'onde ultrasonore, la forme des inhomogénéités thermiques et l'écoulement de sodium perturberont plus ou moins les ondes ultrasonores. De plus ce milieu présente une cartographie du champ des vitesses de l'écoulement très inhomogène.

Le premier milieu simulé dans cette étude est une rangée d'assemblages, débitant du sodium chaud à 570°C . Dans l'inter-assemblage, la température du sodium est de 500°C . Le gradient thermique est linéaire et s'étend sur une distance égale à l'épaisseur d'un bord de l'assemblage. Une représentation du champ de température est donnée en figure 2 avec deux assemblages. Dans ce cas la célérité de l'écoulement n'est pas prise en compte, seule l'influence de la température le sera. Il n'y a pas dans cette situation de répartition aléatoire de la température qui évolue avec le temps, mais des gradients de température stables dans le temps et dans l'espace. Il est donc intéressant d'observer sur un faisceau ultrasonore, le cumul de ces inhomogénéités organisées et répétées.

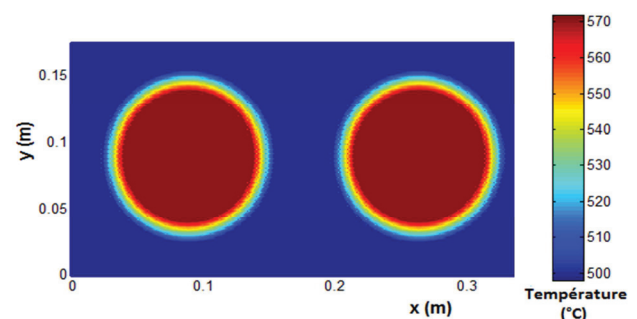


Figure 2. Répartition des températures au-dessus des assemblages.

Le deuxième cas étudié est une coupe verticale du champ des vitesses du sodium de trois assemblages alignés. Cette géométrie correspond à trois flux verticaux ascendants de sodium sortant de chacun des trois

assemblages. Cet écoulement s'effectue à une vitesse de 3 m.s⁻¹. Le sodium situé entre les assemblages est considéré comme immobile. La simulation qui sera réalisée avec cette géométrie ne prend pas en compte l'influence des variations de température que le faisceau rencontrera, ni même les mouvements tourbillonnaires qui pourraient apparaître dans la couche de mélange entre le fluide mobile et immobile ; son but est seulement d'observer l'effet cumulé des gradients de vitesse répétés sur la trajectoire du faisceau, et de voir si cette influence est problématique pour la thermométrie.

4 Modèle rayon et faisceaux gaussiens

Le code AcRaLiS (Acoustics Rays in Liquid Sodium) développé pour cette étude utilise une méthode itérative. A chaque pas de calcul, les caractéristiques thermo-hydrauliques locales, température et vitesse d'écoulement du sodium, sont utilisées pour calculer une nouvelle direction de propagation de l'onde. Le rayon est tracé selon cette direction sur une distance donnée. A cette nouvelle position, la même opération est réalisée.

Concernant le calcul, comme l'indique [15] le modèle repose sur le principe que si une particule du milieu est animée d'une vitesse $\vec{v}(\vec{x})$, l'onde se propagera à une célérité $\vec{v} + c \cdot \vec{N}$ où \vec{N} est la direction de propagation de l'onde et c la célérité des ultrasons.

Soit τ la fonction décrivant les coordonnées de chacun des points du front d'onde. A l'instant t , l'ensemble des points \vec{x}_p appartiennent au front d'onde et sont décrits par cette fonction. Ainsi :

$$t = \tau(\vec{x}_p) \quad (2)$$

Si l'intervalle de temps Δt entre deux positions du front d'onde est suffisamment petit, il est possible d'écrire :

$$\begin{aligned} t + \Delta t &\approx \tau(\vec{x}_p(t) + \dot{\vec{x}}_p(t)\Delta t) \\ &\approx \tau(\vec{x}_p) + \Delta t \dot{\vec{x}}_p(t) \cdot \nabla \tau \end{aligned} \quad (3)$$

Soit $\nabla \tau = \vec{s}$, avec :

$$\vec{s} = \frac{\vec{N}}{c + \vec{v} \cdot \vec{N}} \quad (4)$$

\vec{s} est le vecteur lenteur, avec \vec{v} le vecteur vitesse d'une particule de sodium.

Comme \vec{s} dépend de l'emplacement d'un point $\vec{x}_p(t)$ du front d'onde :

$$\begin{aligned} \frac{d\vec{s}(\vec{x}_p)}{dt} &= \nabla \vec{s} \cdot \dot{\vec{x}}_p \\ &= c(\vec{N} \cdot \nabla) \vec{s} + (\vec{v} \cdot \nabla) \vec{s} \end{aligned} \quad (5)$$

Et :

$$\begin{aligned} \frac{d\vec{s}(\vec{x}_p)}{dt} &= \frac{c}{\Omega} (\vec{s} \cdot \nabla) \vec{s} + (\vec{v} \cdot \nabla) \vec{s} \\ \text{avec } \Omega &= \frac{c}{c + \vec{v} \cdot \vec{N}} = 1 - \vec{v} \cdot \vec{s} \end{aligned} \quad (6)$$

Il est finalement possible de définir l'emplacement d'un point $\vec{x}_p(t)$ du front d'onde avec un système de deux équations :

$$\begin{cases} \frac{d\vec{x}_p}{dt} = \vec{v}(\vec{x}_p, t) + \frac{c^2(\vec{x}_p, t)}{\Omega} \vec{s} \\ \frac{d\vec{s}(\vec{x}_p)}{dt} = -\frac{\Omega}{c} \nabla c - \vec{s} \wedge (\nabla \wedge \vec{v}) - (\vec{s} \cdot \nabla) \vec{v} \end{cases} \quad (7)$$

Ainsi, grâce à ces deux équations (7), il est possible de déterminer le parcours d'un rayon acoustique.

Pour déterminer l'amplitude de l'onde nous appliquons la méthode de la sommation des faisceaux gaussiens [18]. Un profil énergétique gaussien, caractérisé par une décroissance gaussienne en fonction de l'éloignement par rapport au rayon, est utilisé. La largeur à mi-hauteur et l'amplitude maximale sont deux paramètres qui évoluent le long du rayon en fonction de la fréquence de l'onde propagée.

L'avantage de cette méthode est son faible coût de calcul puisqu'il n'est en effet pas nécessaire d'appliquer celle-ci sur toute la longueur du faisceau acoustique, il suffit seulement de le faire dans la zone choisie (à un instant choisi).

La méthode de l'approximation parabolique est utilisée pour ne prendre en compte dans le calcul, que les ondes se propageant dans un cône de petite ouverture centré sur l'axe du rayon. Les ondes créées lors de réflexions ou de diffractions sont ainsi négligées. Cette approximation est parfaitement justifiable dans notre étude car les interactions avec les structures solides présentes dans le milieu ne sont pas étudiées. De plus comme l'hypothèse des ondes de hautes-fréquences est appliquée, le milieu dans lequel les calculs sont réalisés ne contient pas de phénomènes thermo-hydrauliques pouvant engendrer de la diffraction ou de la diffusion.

Avec $u(s, n)$ le déplacement d'une particule dans un repère curviligne associé au rayon :

$$\begin{aligned} u(s, n, t) &= U(s, n, w) \cdot \exp \left\{ -iw \left[t \right. \right. \\ &\quad \left. \left. - \int_{s_0}^s \frac{ds}{c(s)} \right] \right\} \end{aligned} \quad (8)$$

Où w est la pulsation du signal et U une constante de même nature que u , propre à chaque rayon.

Une condition est aussi mise en place sur n dans les étapes de calculs :

$$n = 0 \left(w^{-\frac{1}{2}} \right) \quad (9)$$

Où la valeur $\frac{1}{2}$ a été définie empiriquement par Babich [19]. Le domaine d'application de la méthode ne vaut que pour une zone très proche du rayon, qui tend à diminuer lorsque la pulsation augmente.

En suivant les étapes de résolution de Cerveny [18], on introduit un système de deux équations différentielles linéaires en introduisant deux fonctions complexes $p(s)$ et $q(s)$, et une valeur réelle Φ pouvant différer d'un rayon à un autre. L'amplitude du signal acoustique $u(s, n, t)$ à une certaine distance n du rayon se déduit donc d'un système de trois équations :

$$\begin{cases} q_{,s} = cp \\ p_{,s} = -\frac{q}{c^2} c_{,nn} \\ u(s, n, t) = \Phi \left[\frac{c(s)}{q(s)} \right]^{\frac{1}{2}} \exp \left[-i\omega \left(t - \int_{s_0}^s \frac{ds}{c(s)} \right) + \frac{i\omega p}{2} n^2 \right] \end{cases} \quad (10)$$

Le détail de ces calculs se trouve dans la référence [19]. Afin de pouvoir observer l'évolution d'un front d'onde, ou réaliser une simulation avec un signal acoustique le plus proche de la réalité, ce code a été implémenté de manière à donner à Φ une valeur réelle pouvant dépendre du temps.

Ce code a été validé par l'expérimentation UPSilon (Ultrasonic Path in Silicon Oil) en huile de silicone qui permettait de connaître précisément les gradients de température du milieu de propagation [20-21]. Les simulations et les expériences concordent très bien quant aux déformations des fronts d'ondes sous l'effet des gradients de température.

5 Résultats numériques

5.1 Implémentation des données

Les ondes propagées dans ce code ont des fréquences de l'ordre de quelques mégahertz. Pour simuler correctement leur propagation, il est recommandé que chaque rayon soit propagé avec un pas spatial inférieur ou égal à $\frac{c_{min}}{2\pi f}$ [1], c'est-à-dire d'une distance proche du dixième du millimètre. D'autre part la trajectoire d'un rayon étant sensible aux variations des conditions thermo-hydrauliques du milieu, il n'est pas possible de le propager dans un jeu de données thermo-hydrauliques grossier où ces conditions varient brutalement d'une zone à une autre au risque de ne plus respecter l'hypothèse des ondes de hautes fréquences.

Utiliser un jeu de données thermo-hydrauliques contenant des mailles d'une taille proche du dixième de millimètre est possible, mais cela engendre un volume de donnée très important et inutile. En effet les longueurs caractéristiques des inhomogénéités (de température ou de vitesse) qui ont lieu dans ce milieu étant de l'ordre du centimètre, il y aurait une redondance importante des informations.

Nous avons donc décidé de réaliser une interpolation linéaire des données thermo-hydrauliques pour déterminer les conditions de température et de vitesse en chaque point du passage du rayon. De cette manière, il est d'une part possible d'exploiter des jeux de données thermo-hydraulique très variés (avec des maillages raffinés ou grossiers suivant la turbulence du milieu), tout en conservant des variations de température ou de vitesse d'écoulement suffisamment fines pour permettre la propagation du rayon.

Le principe est d'exploiter une méthode de type triangulation de Delaunay pour gérer un ensemble de données discontinues comme schématisé en figure 4.

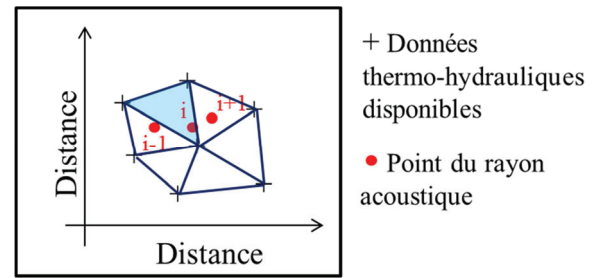


Figure 3. Principe de discrétisation du milieu.

5.2 Simulations et analyses

Les jeux de données thermo-hydrauliques générés numériquement seront utilisés (cf. § 3). Il s'agit d'un modèle simplifié proche de la réalité en termes de taille et d'amplitude des inhomogénéités.

Le signal utilisé pour obtenir une simulation de la répartition acoustique de l'énergie est un signal amorti centré à 2.25 MHz (figure 4).

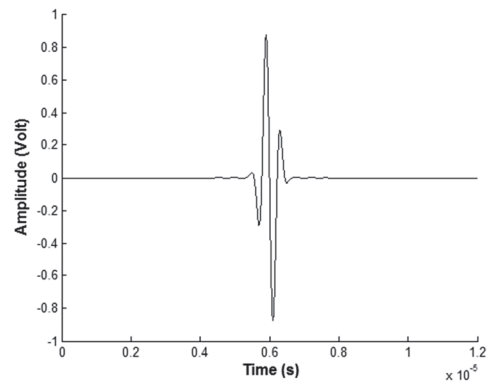
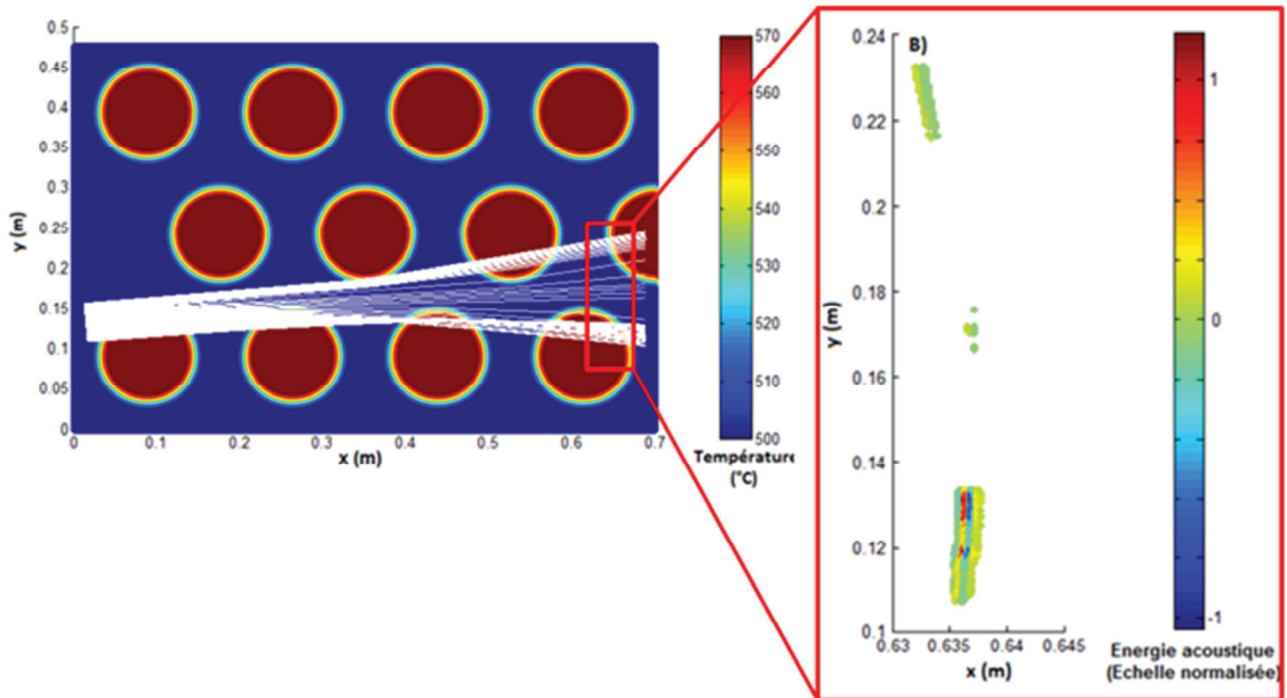


Figure 4: Signal modélisé.

Des premières simulations ont montré que lorsque le faisceau est bien aligné avec la rangée d'assemblages, les rayons se courbent vers le centre de la rangée car les ultrasons sont déviés vers les zones où la célérité du milieu est la plus faible. Il y a un effet de focalisation du faisceau qui sera bénéfique pour une application de thermométrie acoustique [20].

La simulation présentée en figure 5 étudie le cas où une erreur a été faite sur l'orientation du capteur ultrasonore. Elle illustre le potentiel du code à répondre à des questions liées aux incertitudes potentielles de positionnement. Les rayons simulés sont émis avec un angle de 5° par rapport à l'axe de la rangée visée, et sont légèrement décalés par rapport à celle-ci. Les rayons lancés sont parallèles entre eux.

Sur la figure 5a le tracé de rayons indique que pour un angle de 5° , la plupart des rayons passant dans la zone de gradient thermique de la première rangée d'assemblage sont redirigés vers son axe. De même, les rayons passant dans la zone d'influence de la seconde rangée sont eux aussi redirigés vers son axe.



a. Tracé des rayons dans le réseau d'assemblages b. Zoom sur la répartition de l'énergie à 63 cm du capteur

Figure 5. Résultats de simulation du code AcRaLiS pour une désorientation du capteur

Sur la figure 5b, il apparaît trois fronts d'ondes distincts. Le faisceau ultrasonore est donc divisé en trois parties et la méthode de sommation des faisceaux gaussiens permet de prévoir les amplitudes relatives de ces parties. A la vue de l'angle d'incidence des rayons par rapport aux bords externes et internes des têtes d'assemblage, il est peu probable que des échos revenant directement vers le transducteur soient générés. Ainsi cette erreur d'orientation pourrait avoir pour conséquence la perte des signaux ultrasonores, ce qui ne permettrait plus de réaliser la mesure de température. Pour la même raison la probabilité est faible d'obtenir des échos provenant des rayons se propageant dans la seconde rangée. Cette simulation indique de plus l'importance de propager un faisceau ultrasonore au-dessus d'une rangée d'assemblage pour atteindre une tête d'assemblage et réaliser une mesure de température.

Le deuxième jeu de données (cf § 3) a permis d'étudier les conséquences des vitesses ascendantes du fluide. Dans le cas où le transducteur ultrasonore est éloigné et au-dessus du cœur, les ultrasons ont une trajectoire légèrement descendante afin d'atteindre les têtes d'assemblage. 25 rayons parallèles ont été générés chacun ayant un angle descendant de 5° par rapport à l'horizontale. Les simulations montrent que le parcours des ultrasons n'est que très faiblement dévié par ce champ des vitesses. De même le front d'onde calculé avec la méthode des faisceaux gaussiens ne semble que peu perturbé par les trois flux de sodium. Pour ce champ des vitesses et pour cet angle de propagation, l'influence du champ des vitesses de l'écoulement se traduit par une déviation verticale de l'ordre de 0.4 millimètre après 0.5 mètre de propagation si l'on compare les coordonnées du rayon central du faisceau de cette simulation, avec les coordonnées d'un rayon se propageant avec la même incidence dans un milieu

homogène. D'autres simulations ont été réalisées avec des angles de propagation plus importants (jusqu'à 10°) : les résultats indiquent une augmentation de la déviation verticale, mais toujours dans des ordres de grandeurs d'un demi millimètre.

Dans ces conditions thermo-hydrauliques et acoustiques particulières, l'influence du champ des vitesses de l'écoulement semble trop faible pour avoir un impact significatif sur la thermométrie ultrasonore d'une tête d'assemblage. Il sera cependant nécessaire de prendre en compte d'autres phénomènes hydrauliques turbulents ayant une existence au-dessus du cœur (impact du bouchon couvercle cœur, turbulence à proximité des barres de contrôle et de commande, ...), avant de généraliser cette conclusion.

5. CONCLUSION

Le code de simulation AcRaLiS a été implémenté afin de mieux comprendre la propagation des ultrasons dans des milieux fluides turbulents et inhomogènes, et ainsi permettre de développer une instrumentation adaptée aux réacteurs de quatrième génération tels que les Réacteurs à Neutrons Rapides à caloporteur sodium. Ce code s'appuie sur la théorie de l'acoustique géométrique et utilise la méthode de sommation des faisceaux gaussiens. Il permet de simuler la propagation d'une onde ultrasonore dans du sodium liquide présentant de fortes inhomogénéités de température et un champ de vitesses d'écoulements turbulents.

Les premiers résultats sur des configurations d'assemblages, avec des distributions de températures et d'écoulements simulées et non bruitées, sont cohérents. Ils confirment le potentiel de cette approche pour envisager la thermométrie acoustique au-dessus du cœur de réacteur.

Les résultats des simulations indiquent qu'un faisceau ultrasonore se propageant à la verticale d'une rangée

d'assemblages va être dévié et avoir tendance à se concentrer dans l'axe de cette rangée. De plus, il apparaît que pour réaliser des mesures ultrasonores sur la tête d'un assemblage particulier, depuis un traducteur éloigné, il est préférable de propager les ultrasons suivant une rangée d'assemblages pour éviter l'éparpillement du faisceau ultrasonore.

Enfin, les premières simulations faisant intervenir un écoulement unidirectionnel indiquent que cet écoulement aura peu d'influence, dans les cas particuliers traités dans cette étude, sur la propagation des ultrasons. Cette simplification est raisonnable si l'on considère la distribution des vitesses juste en sortie des assemblages car les jets ont un nombre de Reynolds élevé mais une distribution homogène des vitesses. Il sera nécessaire cependant d'envisager les interactions des jets avec les structures au-dessus du cœur (bouchon couvercle cœur) qui peuvent créer des modifications importantes du comportement des jets en sortie.

Afin d'aller plus loin dans la compréhension des turbulences, une plate-forme expérimentale est prévue pour mettre en œuvre des instabilités de Kelvin-Helmholtz, en eau homogène en température [20]. Une comparaison entre les données numériques, issues des simulations, et les données expérimentales, permettra de déterminer la validité du modèle théorique des rayons dans des conditions thermo-hydrauliques encore plus proches des conditions réelles.

Le code AcRaLiS sera développé afin de prévoir la réflexion du faisceau ultrasonore sur une cible solide comme un bord d'assemblage afin de prévoir le trajet retour des ultrasons. La prise en compte des caractéristiques réelles de la source sera aussi nécessaire pour valider l'emploi des Traducteurs UltraSonores Haute Température (TUSHT) que développe le CEA dans ce type d'application.

REFERENCES

[1] F. Gauché, Generation IV approach -- the development of sodium fast reactors, *Magneto-hydrodynamics*, 48, 191-195 (2012).

[2] F. Jadot, F. Baqué, J. Ph Jeannot, G. de Dinechin, J.M. Augem and J. Sibilo, "ASTRID sodium cooled fast reactor: Program for improving in service inspection and repair," in *Advancements in Nuclear Instrumentation Measurement Methods and their Applications (ANIMMA)*, 2011 2nd International Conference on, 2011, pp. 1-8.

[3] Cavaro, M., Payan, C., Moysan, J., Baque, F., Microbubble cloud characterization by nonlinear frequency mixing, *JOURNAL OF THE ACOUSTICAL SOCIETY OF AMERICA*, 129-5, EL179-189, 2011

[4] K. Paumel, J. Moysan, D. Chatain, G. Corneloup, and F. Baqué, Modeling of ultrasound transmission through a solid-liquid interface comprising a network of gas pockets, *J. Appl. Phys.*, vol. 110, no. 4, p. 044910, 2011.

[5] CORNELOUP G, PLOIX M.A., CHAIX J.F., LILLAMAND I. & BAQUE F., Potential of ultrasounds for NDT of a structure behind parallel immersed plates, *Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation 30*, Congrès **QNDE 2010**, San Diego (Californie), 18-23 juillet 2010

[6] N. Massacret, J. Moysan, M.A. Ploix, J.P. Jeannot and G. Corneloup, Simplified Modelling of Liquid Sodium and Velocity Gradient using Real Thermal-hydraulic Data. Application to Ultrasonic Thermometry in Sodium Fast

Reactor – Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation **32**, **QNDE congress**, Denver (Co.), USA, July 2012, pp. 1693-1700.

[7] L. Leibowitz, M.G. Chasanov, and R. Blomquist, "Speed of sound in liquid sodium to 1000 degrees C, *J. Appl. Phys.* 42, 2135 (1971).

[8] J.A. McKnight, I.D. Macleod, E.J. Burton, Procédé de mesure de température par ultrasons, UKAEA, patent n°8501470 (1985).

[9] C.G. Taylor, S. Birch, Subassembly outlet temperature measurement using ultrasound. Preliminary results of the water tests in the HIPPO rig, ISTD, AEA Technology, Risley, 1992.

[10] B. Iooss, C. Lhuillier, H. Jeanneau, Numerical simulation of transit-time ultrasonic flowmeters: uncertainties due to flow profile and fluid turbulence, *Ultrasonics*, 40, 1009 (2002).

[11] L. Dallois, "Extension grand angle de l'approximation parabolique", Thèse École Centrale de Lyon, Lyon, 2000

[12] S. Kon, K. Yamaguchi, H. Ohbayashi, Y. Tasaka, Y. Murai, Y. Takeda, in *Velocity Vector Profile Measurement using Multiple Ultrasound Transducers: Proceedings of the 5th International Symposium on Ultrasonic Doppler Methods for Fluid Mechanics and Fluid Engineering*, ETH Zurich, Switzerland, 12-14 September 2006, edited by H. Birkhofer, A.K. Jeelani and J. Windhab, pp. 19-22.

[13] J. P. Girard, Fluctuations de température en sortie d'assemblage – Etude analytique et spectrale, CEA-Cadarache, DRNR/STRS/LEIS, RT n° 8686, 1978. [14] D. Tenchine, J.P. Moro & J. Barroil, "Jets coaxiaux : comparaison des fluctuations de températures en sodium (NAJECO) et en air (AIRJECO)", CEA, DTP/STR/LES/NT 94-165, 1994

[15] M. Blackmore, Theoretical investigation of the effect of turbulence and temperature – Gradients on sound transmission, Topexpress Ltd, Cambridge, 1982.

[16] N. Kimura, H. Miyakoshi, & H. Kamide, Experimental investigation on transfer characteristics of temperature fluctuation from liquid sodium to wall 173 in parallel triple-jet, *Int. J. Heat Mass Transf.*, vol. 50, no. 9–10, pp. 2024–2036, May 2007.

[17] N. Massacret, J. Moysan, M.A. Ploix, J.-P. Jeannot, G. Corneloup, Simplified modelling of liquid sodium medium with temperature gradient from thermohydraulic measurements to simulate wave propagation in liquid sodium. Application to ultrasonic thermometry in Sodium Fast Reactor, 7th GDRE Meeting, Oleron, May 2012, France

[18] V. Cervený, M. Popov, & I. Psencik, "Computation of wave fields in inhomogeneous media – Gaussian beam approach," *Geophys. J. R. Astron. Soc.*, vol. 70, no. 1, pp. 109–128, 1982

[19] V. M. Babich & V. S. Buldyrev, "Asymptotic methods in problems of diffraction on short waves," Nauka, Moscow, 1972

[20] N. Massacret, Etude d'une méthode ultrasonore d'estimation des températures locales du sodium liquide en sortie de cœur de RNR-Na, thèse de doctorat, Aix-Marseille Université, 2013

[21] N. Massacret, J. Moysan, M.A. Ploix & J.P. Jeannot, Validation of predicted path of thermally deflected ultrasonic waves, 13th NDCM, Le Mans, 20-25 mai 2013.