

Commissariat à l'Energie Atomique
DEN/DER/SRES
Laboratoire de Préparation et de Réalisation des Essais (LPRE)
C.E. Cadarache
13108 Saint Paul lez Durance

Sujet : Méthodologies de traitement, d'analyse et de diagnostic avancés de signaux expérimentaux : application au comportement d'un élément combustible en situation accidentelle

Contacts CEA :

Laurent Pantera
CEA Centre de Cadarache
DEN/CAD/DER/SRES
Laboratoire de Préparation et Réalisation des Essais(LPRE)
Bât. 223 13108 Saint-Paul-Lez-Durance
Laurent.pantera@cea.fr
Téléphone : 04.42.25.74.95 - fax : 40 87 Secrétariat : 32 37

Florence Jeury
Chef du Laboratoire LPRE
Florence.jeury@cea.fr

Contexte :

CABRI est un réacteur expérimental destiné aux études de sûreté en soutien au parc électronucléaire. Le nouveau programme d'essais « CABRI International Program » (CIP) a pour objectif d'étudier le comportement de crayons combustibles de type REP, à haut taux de combustion, équipés de gainage dits « avancés », lorsqu'ils sont soumis à un accident d'insertion de réactivité (correspondant à l'éjection d'une barre de contrôle).

Dans le cadre de ce programme piloté par l'IRSN (Institut de Radioprotection et de Sûreté Nucléaire), l'installation CABRI fait actuellement l'objet d'importantes modifications. Une des plus importantes porte sur la fabrication et la mise en place d'une boucle de refroidissement à eau sous pression (remplaçant l'ancienne boucle de refroidissement au sodium). Cette nouvelle boucle permettra de réaliser les essais dans des conditions thermo-hydrauliques représentatives de celles des réacteurs à eau sous pression.

Ce nouveau programme « CIP » comprend au total 12 essais : deux essais ont déjà été réalisés fin 2002 avec la boucle de refroidissement au sodium (essais CIP0-1 et CIP0-2), 10 autres essais seront réalisés à partir de fin 2014 avec la nouvelle boucle de refroidissement à eau sous pression.

Afin d'obtenir l'autorisation réglementaire pour la réalisation du premier essai, le programme expérimentale CIP sera précédé d'une campagne d'essais de démarrage pendant laquelle les différents ensembles fonctionnels de l'installation, notamment la boucle à eau sous pression, seront testés.

Le LPRE, en charge de la préparation, de la réalisation et du dépouillement des essais, souhaite mettre en place un nouveau dispositif d'analyse des essais basé sur l'analyse spectrale de la réponse des capteurs des dispositifs d'essais.

Le LPRE a commencé à appliquer cette nouvelle méthodologie d'analyse aux essais déjà réalisés dans l'installation CABRI avec la boucle de refroidissement au Sodium, de manière à valider ce nouveau principe de dépouillement. Les résultats ont été tout à fait prometteurs. Le LPRE souhaite donc poursuivre ce travail.

Objectif :

Après chaque essai, les expérimentateurs sont amenés à se prononcer le plus rapidement possible sur l'absence ou pas de rupture de la gaine de l'élément combustible testé (appelé également crayon). Ce diagnostic est effectué à partir des signaux obtenus en ligne, notamment à partir de deux microphones (M1, M2) placés en amont et en aval du dispositif d'essai.

Lors du dernier essai réalisé sur CABRI dans la boucle de refroidissement au sodium, un événement inhabituel a été détecté en fin d'essai par les microphones, mais également par d'autres capteurs du dispositif d'essai (notamment les capteurs de pression et les débitmètres).

Cet événement n'avait pas la signature classique d'une rupture ; en effet :

- l'événement était détecté par le microphone M2 principalement (lors d'une rupture les deux microphones M1 et M2 enregistrent un signal dans le même ordre d'amplitude avec un décalage temporel fonction de la localisation de la rupture)
- la chronologie de détection de l'événement par les différents capteurs était inhabituelle; les capteurs de pression et de débit détectaient l'événement avant les microphones (lors d'une rupture les microphones détectent l'événement en premier, la vitesse du son dans les structures étant plus importante que la vitesse de déplacement de l'onde de choc générée par l'éjection de gaz et de combustible au sein du caloporteur sodium)
- les signaux des capteurs de pression et des débitmètres présentaient des oscillations inhabituelles, rapides et de large amplitude.

Face à ces interrogations, il a été mené une étude basée sur l'analyse en temps-fréquence des réponses des capteurs du dispositif de manière à chercher si l'événement tardif s'identifiait, d'un point de vue spectral, à un événement déjà rencontré lors des essais précédents du programme. Cette analyse a permis de mettre en évidence la similitude de cet événement tardif avec un événement tardif d'un essai antérieur qui n'avait pas conduit à une rupture de gaine. Il a donc été conclu, grâce à cette analyse spécifique, que l'élément combustible avait gardé son étanchéité, conclusion qui a pu être confirmée ultérieurement par des examens destructifs du crayon d'essai.

Il n'a cependant pas été possible de connaître l'origine de cette perturbation : s'agissait-il d'un phénomène lié au fonctionnement même de l'installation ?

La nécessité de cette analyse a augmenté le temps de diagnostic, ce qui est préjudiciable vis à vis de notre client IRSN et des partenaires industriels du programme CIP. Nous cherchons donc à mettre en place une méthode d'analyse appropriée à nos signaux qui permettrait d'établir un outil informatique d'aide au dépouillement pour les expérimentateurs.

Méthode

Le travail proposé fait appel à l'analyse de données expérimentales collectées à partir des équipements d'acquisition de mesures mis en place sur le réacteur CABRI qui est situé sur le centre de Cadarache. Le système d'acquisition des données a été entièrement rénové et est opérationnel. Des données d'anciens essais pourront dans un premier temps être exploitées pour orienter le travail de Recherche : ces données sont facilement accessibles à partir d'une base de données relationnelle. A partir de la nouvelle configuration de fonctionnement, le travail consistera à réaliser autant d'acquisition qu'il sera nécessaire pour caractériser le fonctionnement de la nouvelle installation hors phase expérimentale, puis de compléter ces acquisitions par celles qui seront réalisées en phases expérimentales, c'est-à-dire avec l'élément combustible à tester. L'étude devra permettre de définir une typologie des événements observés hors des phases expérimentales afin de mettre en évidence lors d'un essai les événements liés au comportement testé. La typologie s'appuiera en particulier sur l'analyse des signaux obtenus par deux microphones placés en amont et en aval du dispositif d'essai ainsi que sur des capteurs de pression et des débitmètres.

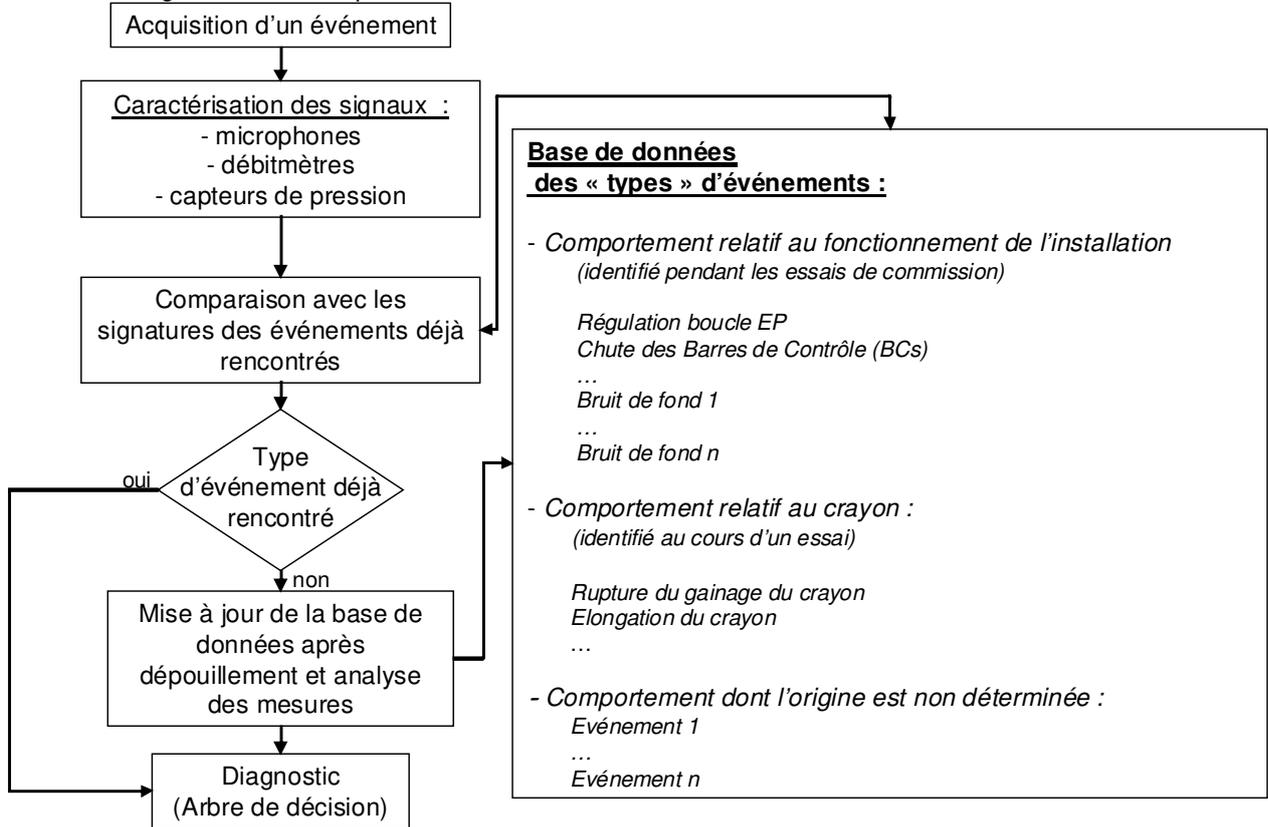
Le but est d'améliorer la caractérisation de chaque événement enregistré au cours d'un essai par une analyse conjointe des signaux acquis en ligne.

Les événements sont relatifs à des phénomènes physiques provenant :

- du fonctionnement propre de l'installation (chute des Barre de Contrôle (BCs) du réacteur, mise en route des différents organes de régulation de la boucle à eau,...),
- du comportement du crayon d'essai (élongation de la gaine, rupture du crayon,...).

Résultats attendus :

Le résultat pratique attendu consiste à établir une méthode de diagnostic, sous forme d'arbre de décision par exemple, qui permettrait, lors de l'acquisition d'un nouvel événement de le situer automatiquement par rapport aux événements issus d'une base de connaissance qui est à établir. Cette étude permettra de faciliter le diagnostic de rupture pour les essais CABRI à venir mais de façon plus générale elle devrait permettre de contribuer à proposer une méthodologie d'analyse applicable sur d'autres réacteurs expérimentaux confrontés aux mêmes types de signaux. Le schéma suivant traduit l'idée générale de ce qui est attendu :



Méthodologie d'ensemble

Phasage :

Phase 1 :

Etude Bibliographique

Constitution de la base de connaissance fonctionnement de l'installation

Événements relatifs au fonctionnement de l'installation :

Pendant les essais de commission (essais de préparation d'un essai réalisés sans le combustible) menés avec le DHI¹, le bruit de fond de l'installation pourra être mesuré lors de son fonctionnement aux conditions représentatives des futurs essais CABRI (pression de la boucle EP : 155 bar, température : 300°C).

Les événements détectés par les microphones du DHI seront caractérisés par leurs signatures spectrales au niveau des signaux de ces capteurs, mais également au niveau des réponses des débitmètres et des capteurs de pression du dispositif, si ces événements sont également détectés par ces appareils. Dans la mesure du possible, l'origine de chaque perturbation sera déterminée.

¹ DHI : Dispositif Hydraulique Instrumenté

Les essais de commission permettront donc de répertorier les différents événements de type « bruit de fonctionnement de l'installation » pour des conditions de fonctionnement de l'installation représentatives des futurs essais CABRI, dans la base de données relationnelle « événements » contenant les événements des anciens essais.

Classification des signaux

La classification devra permettre d'effectuer un diagnostic à partir des configurations physiques qui auront été mises en évidence lors de la constitution de la base de connaissance

Phase 2 :

Mise à jour de la base de connaissance à partir des événements acquis en phase expérimentale.

Événements relatifs au comportement de l'élément combustible :

Lors des essais, chaque événement observé sera analysé à partir de tous les signaux qui le caractérisent. Par comparaison avec les événements déjà répertoriés, il sera identifié soit comme « bruit de fonctionnement de l'installation », soit comme « comportement crayon ». L'analyse de l'essai tentera de déterminer l'origine de l'événement. Suite à cette analyse, la base de données sera réactualisée.

Ajustement de la procédure de diagnostic

La faible quantité d'événements disponibles caractéristiques d'un phénomène de rupture ne nous permet pas de raisonner en termes de pourcentage d'erreur. La procédure devra être la plus déterministe possible.

Intérêts scientifiques du travail proposé

Nous décrivons dans ce qui suit l'orientation scientifique qui sera donnée dans le travail de recherche proposé.

1. Aspects théoriques

Le travail scientifique de la thèse relatif au traitement du signal entrera dans le cadre dit des **problèmes inverses** appliqué à des signaux **non stationnaires** vibroacoustiques. La résolution des problèmes inverses est fondamentalement difficile étant donné le grand nombre d'inconnues qui les caractérisent. De nombreux efforts ont récemment été déployés dans ce domaine avec des succès prometteurs en milieux industriels. L'objectif scientifique consistera à adapter certaines méthodes pour caractériser le fonctionnement du réacteur CABRI et proposer des aides aux interprétations physiques des phénomènes lors de la phase expérimentale. Nous pouvons distinguer trois axes méthodologiques pour aborder les problèmes inverses : la déconvolution, **l'identification aveugle** et la **séparation de sources**. Étant données les conditions expérimentales complexes des essais CABRI, il ne sera pas possible d'élaborer la fonction de transfert du dispositif d'essai. Les méthodes d'identification en aveugle seront donc privilégiées : nous chercherons plutôt à reconstruire une fonction de transfert afin de pouvoir mettre en évidence une détérioration de la structure et ainsi espérer mettre en évidence des éléments précurseurs à une rupture de gaine éventuelle. De plus, le fonctionnement du réacteur CABRI implique le fonctionnement de plusieurs organes, l'analyse des signaux vibratoires se heurte à la difficulté de pouvoir reconnaître au niveau des capteurs les contributions de plusieurs phénomènes de natures différentes inhérents au fonctionnement de l'installation que l'expérimentateur ne peut maîtriser de manière indépendante. Nous chercherons donc à savoir décomposer les contributions de chacune des sources au niveau des mesures pour pouvoir ensuite les analyser individuellement. Nous nous orienterons alors vers l'adaptation de techniques récentes d'analyse basées sur les statistiques d'ordre supérieur et l'approche temps-fréquence pour les événements à caractère impulsif et vers des approches de type analyse **cyclostationnaire** pour l'analyse des signaux relatifs au fonctionnement continu de l'installation : cette dernière approche donne de très bons résultats dans la surveillance acoustique et vibratoire des machines. De plus, le contexte de travail est caractérisé par un nombre relativement faible de

mesures avec peu d'information sur la nature des voies de propagation (modèle analytique, numérique ou expérimental). Il sera alors judicieux d'inscrire le développement des méthodes de traitement du signal dans un **cadre bayésien**. Celui-ci permettra de compenser le manque d'information statistique (mesures) et physique (modèles) par des informations a priori de diverses natures (subjectives, expertes, phénoménologiques), ce qui permettra de mieux régulariser le problème et de forcer l'identification en aveugle et la séparation de sources vers des solutions physiques admissibles.

L'élaboration d'une méthodologie d'analyse basée sur une utilisation conjointe des aspects « cyclostationnaire » et « séparation de source » inscrite dans un « cadre bayésien » constitue une idée originale et forte.

Pour fixer les idées, nous explicitons dans ce qui suit chaque terme technique employé précédemment en proposant un début d'analyse bibliographique correspondant à notre problématique pour chacun d'entre eux.

Cyclostationnaire:

Les organes tournants liés au fonctionnement continu de l'installation génèrent des signaux de nature cyclostationnaires, c'est-à-dire dont les propriétés statistiques sont périodiques au cours du temps. Ces caractéristiques peuvent être utilisées comme "marqueurs" afin de reconnaître (à l'aide de méthodes d'analyse spectrale dite "cyclique" qui décomposent le signal à la fois en fréquence porteuses et en fréquences de modulation) et d'extraire (à l'aide de filtres périodiquement variables très sélectifs) les contributions de ces composantes du signal global dans le but final d'améliorer le rapport signal-à-bruit, en particulier dans une phase de pré-conditionnement en amont de l'identification aveugle et de la séparation de sources.

Séparation de sources:

Lorsque les phénomènes d'intérêt sont observés simultanément à l'aide de plusieurs capteurs mais en présence d'interférences qui proviennent d'autres sources de bruit, la "séparation aveugle de sources" consiste à appliquer une matrice de filtres sur les signaux mesurés dont les sorties donnent une estimation la plus fidèle possible des différentes sources qui composent le mélange. La séparation est dite aveugle car elle ne nécessite pas la connaissance des voies de propagation (fonctions de transfert) de chaque source à chaque capteur, mais se fonde uniquement sur l'hypothèse d'indépendance statistique de sources qui proviennent de phénomènes physiques différents. L'application de cette approche très attractive par rapport à notre contexte nécessite cependant de lever un certain nombre de difficultés pratiques liées à la détermination du nombre de sources à prendre en compte, à la robustesse de la séparation vis-à-vis du bruit de fond, et de la considération de mélanges de type convolutif. Un effort particulier devra être déployé pour se placer dans le bon espace de représentation (conception d'une base/trame d'ondelettes spécifique) qui permet de bien capter la structure des signaux impulsifs avec un minimum de composantes afin d'améliorer le pouvoir de séparation, pour débruiter au préalable les mesures par des approches cyclostationnaires et pour guider la séparation par injection d'information a priori (en terme probabiliste sur la nature des signaux à séparer et éventuellement sur certaines fonctions de transfert du système) dans le cadre de l'inférence bayésienne.

Cadre bayésien:

L'utilisation de l'approche bayésienne nous permettra de palier le manque d'information auquel nous serons confrontés lors de la mise en œuvre des méthodes de traitements du signal précédemment décrites. Des densités de probabilité a priori devront ainsi être construites sur les coefficients de la décomposition des signaux d'intérêt dans une base/trame d'ondelettes, ainsi qu'une représentation probabiliste des fonctions de transfert en terme d'amplitude et de phase. Par ailleurs, le cadre bayésien sera aussi idéal pour prendre en compte toutes les sources d'erreurs (mesures, incertitudes de modèle) et les propager sur les estimateurs finaux.

2. Aspects informatiques

Avant de pouvoir procéder à l'analyse précise des signaux et de dégager une orientation méthodologique originale, il sera nécessaire de procéder à la manipulation et au traitement de fichiers de grandes tailles dont il faudra extraire les signaux caractéristiques du fonctionnement de l'installation. Un travail a déjà été réalisé courant 2010 pour mettre en place le cadre informatique autour d'une base de données relationnelle nécessaire pour faciliter le traitement des données. Mais il sera demandé au thésard de faire preuve d'un intérêt particulier pour l'informatique et plus particulièrement pour la programmation en langage R. Nous souhaitons en effet utiliser ce travail de Recherche pour participer à la communauté R en proposant un package qui regrouperait les aspects de l'étude jugés diffusables afin que les outils mis en places puissent être utilisés sur d'autres projets scientifiques similaires : algorithme d'apprentissage d'événements sur de grands fichiers, séparation de sources vibroacoustiques etc...

Références :

- [1] "Cyclostationarity by examples"
Mechanical Systems and Signal Processing, Volume 23, Issue 4, p. 987-1036.]
J. Antoni
- [2] "Blind extraction of a cyclostationary signal using reduced-rank cyclic regression—A unifying approach", Mechanical Systems and Signal Processing, Volume 22, Issue 3, pp.520-541
R. Boustany, J. Antoni
- [3] "Bayesian blind source separation for brain imaging"
IEEE International Conference on Image Processing, 11-14 Sept. 2005, pp. III - 581-4
H. Snoussi, V.D. Calhoun
- [4] "A Bayesian approach to source separation"
Proceedings of the First International Workshop on Independent Component Analysis and Signal Separation: ICA'99, Aussios, France, Jan. 1999, pp. 283-288.
K.H. Knuth
- [5] "Stochastic Transfer Function in Bayesian Inference For Combustion Indicator Estimation"
Eusipco 2009, 17th European Signal Processing Conference, August 24-28, 2009, Glasgow, Scotland]
E. Nguyen, J. Antoni
- [6] R: A language and environment for statistical computing.
R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. ISBN 3-900051-07-0
R Development Core Team (2008)
URL <http://www.R-project.org>.

Mots clés : modèle bayésien, statistique d'ordre supérieur, traitement temps fréquence, cyclostationnarité langage R