

# Détection, classification d'événements par surveillance acoustique de générateurs de vapeur au sodium

Pierre BEAUSEROY<sup>1</sup>, Edith GRALL-MAËS<sup>1</sup>, Igor NIKIFOROV<sup>1</sup>, François BAQUE<sup>2</sup>, Olivier DESCOMBIN<sup>2</sup>, Olivier GASTALDI<sup>2</sup>

<sup>1</sup>UTT - Institut Charles Delaunay - UMR STMR  
12 rue Marie Curie, BP 2060, 10010 Troyes Cedex, France

<sup>2</sup>CEA Cadarache, DEN/DTN/STPA/LIET,  
Bâtiment 202, 13108 St Paul lez Durance CEDEX, France

pierre.beuseroy@utt.fr, igor.nikiforov@utt.fr, edith.grall@utt.fr,  
francois.baque@cea.fr, olivier.descombin@cea.fr, olivier.gastaldi@cea.fr

**Résumé** – L'étude menée a pour objectif de tester un dispositif de détection de la réaction chimique sodium-eau (cas de fuite des tubes de générateurs de vapeur (GV) de réacteurs nucléaires à caloporteur sodium). Un second objectif est de comparer les réponses du système de détection obtenues lors d'injections d'eau et d'injections d'argon pour évaluer la sensibilité du système de surveillance et déterminer si il est possible de simuler des réactions eau-sodium en remplaçant l'eau par l'argon. Les travaux comportent deux parties: une étude de faisabilité de la détection/localisation séquentielle des injections d'eau et d'argon suivie d'une étude des différences entre les injections d'eau et celles d'argon.

Les résultats montrent d'une part que les sondes acoustiques permettent de détecter et de localiser les injections d'eau et d'argon. Ils montrent d'autre part que l'argon n'est pas un substitut parfait de l'eau et que certaines caractéristiques permettent clairement de les différencier.

**Abstract** – Based on acoustic sensors, this study aims to design a monitoring device that detect sodium/water reaction in particular when mixing sodium water (in cases of steam generator tubes leak). A second objective is to compare the responses of the detection system obtained during water injections to that resulting from injections of argon to assess the sensitivity of the monitoring system and to determine to what extent it is possible to simulate sodium-water reaction by replacing water with argon. Firstly a feasibility study for the sequential detection and localization of water and argon injections is performed. Secondly we try to find characteristics that clearly distinguish water from argon injections.

Experimental results show that acoustic sensors can detect and locate water and argon injections. They show further that argon is not a perfect substitute to water and some features can clearly distinguish them.

## 1 Contexte et objectif

Dans le cadre des réflexions concernant le développement de centrales nucléaires de 4ème génération, l'usage du sodium liquide comme fluide caloporteur est envisagé. Dans ce contexte, il est nécessaire de développer des outils de surveillance adaptés. La réaction entre l'eau (sous pression) et le sodium, risque identifié dans les générateurs de vapeur (GV), fait partie des points importants à surveiller.

Afin d'étudier la réponse acoustique induite par une réaction entre le sodium et l'eau, nous avons étudié des signaux recueillis lors de la mise à l'arrêt, en 1994, de la centrale à neutrons rapides PFR située en Grande-Bretagne. Afin de simuler cette réaction chimique, l'AEA a réalisé des essais d'injections d'argon, mais également d'eau, dans le sodium liquide de l'un des Générateurs de Vapeur (GV). Cette expérience avait pour objectif de tester les dispositifs de détection acoustique de la réaction entre le sodium et l'eau (cas de fuite des tubes de GV).

L'étude de ces enregistrements, fournis par le CEA [5], [8], [6], a deux objectifs, d'une part vérifier la sensibilité des capteurs acoustiques lors de cette réaction et d'autre part compa-

rer la réaction des détecteurs aux injections d'eau avec celle obtenue avec les injections d'argon afin de déterminer s'il est possible, du point de vue des contrôles périodiques, de simuler des réactions sodium-eau (dont les conséquences sont difficiles à accepter pour une installation neuve) par des injections d'argon dans le sodium (ces dernières n'étant pas accompagnées de dégagement de chaleur, leur effet sur l'installation est très peu perturbant). Par conséquent, cette substitution permettrait également de tester et de caractériser des dispositifs de surveillance à implanter sur de nouvelles générations de centrales.

Dans un premier temps nous présentons les signaux de surveillance acoustiques. Ensuite le problème de détection, localisation des injections d'eau et d'argon est introduit et les résultats de l'étude de faisabilité sont présentés. La section suivante présente une caractérisation des signaux d'injections et les résultats de classification obtenus. La conclusion synthétise d'une part les éléments de réponses issus de cette étude concernant la détection de la réaction entre le sodium et l'eau et d'autre part les principales différences entre les injections d'eau et d'argon observées avec ce jeu de données.

## 2 Les données

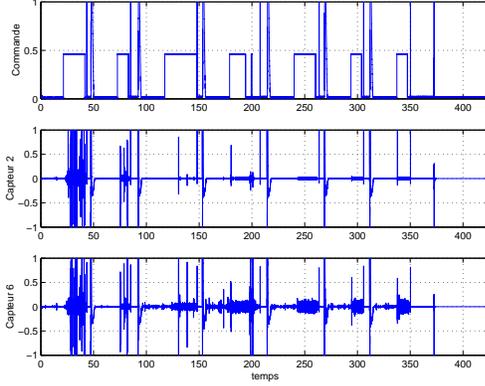


FIGURE 1 – Signaux bruts

Le dispositif de surveillance est constitué de deux sondes acoustiques passives. Chaque essai peut comporter de 1 à 7 injections. Chaque enregistrement correspond à un essai et contient la réponse échantillonnée à 2kHz des deux sondes et le signal de commande d’injection d’eau ou d’argon. Les signaux ont été filtrés avant analyse afin d’atténuer les nombreux parasites qui les perturbent (figure 1). Au total, la base de données permet d’isoler 43 injections d’argon et 30 injections d’eau. La durée des injections et le débit du fluide varient très significativement selon les injections (de 30s à 480s et de 0.22g/s à 28.5g/s). Le signal de bruit de fond (état de fonctionnement nominal) est mesuré uniquement sur la partie de signal précédant la première injection de chaque essai. Après injection, le signal reste perturbé par la dissipation du nuage de bulles résiduelles.

Une étude spectrale dépendante du temps a été effectuée afin d’analyser l’évolution dans le temps du contenu spectral du bruit de fond (signal hors injection). Compte tenu de l’évolution lente du signal, cette étude a été réalisée à l’aide de spectrogrammes. Cette étude montre que d’un point de vue local, le contenu fréquentiel du signal varie dans le temps, mais qu’à plus grande échelle il est indépendant du temps (figure 2). Les signaux sont donc supposés stationnaires sur les portions d’intérêt (bruit de fond, injections d’eau, injections d’argon).

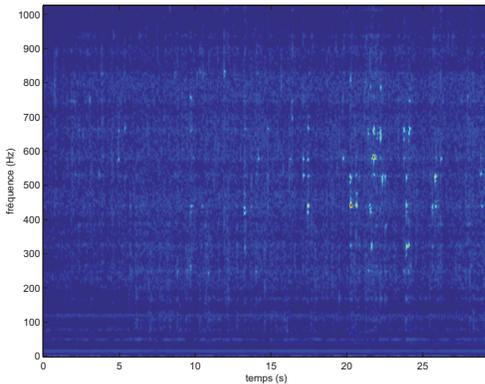


FIGURE 2 – Spectrogramme du signal pfr56

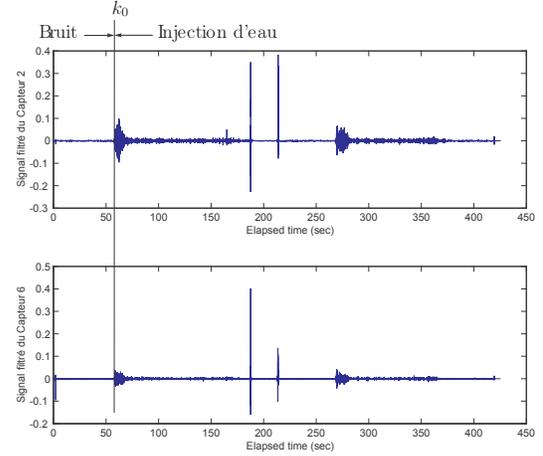


FIGURE 3 – Échantillon pfr44 eau : l’injection d’eau.

## 3 Détection - Localisation

### 3.1 Formulation du problème

Les problèmes à résoudre sont les suivants :

- détecter l’apparition d’injection d’argon ou d’eau dans le sodium de l’un des GV du réacteur à neutrons rapides ;
- identifier le type d’injection (argon ou eau).

Nous faisons l’hypothèse que les mesures de chaque capteur  $(y_k)_{k \geq 1}$  sont définies par l’équation ARMA( $p, q$ ) suivante :

$$y_k = \sum_{i=1}^p a_i y_{k-i} + \xi_k - \sum_{i=1}^q b_i \xi_{k-i}, \quad \xi_k \sim \mathcal{N}(0, \sigma^2).$$

Une réalisation typique (échantillon pfr44 après un pré-traitement par la decimation et le pré-filtrage) est présentée sur la figure 3. L’instant  $k_0$  de rupture de modèle est marqué par une ligne verticale. Le changement du vecteur de paramètres est donc :

$$\{a_i, b_i, \sigma^2\} = \begin{cases} \{a_i, b_i, \sigma^2\}_b & \text{si } k < k_0 \\ \{a_i, b_i, \sigma^2\}_a & \text{si } k \geq k_0 \text{ \& injection d'argon} \\ \{a_i, b_i, \sigma^2\}_e & \text{si } k \geq k_0 \text{ \& injection d'eau} \end{cases}$$

où  $\{a_i, b_i, \sigma^2\}$  sont les paramètres du modèle ARMA sous les différentes hypothèses qui doivent donc être estimés.

### 3.2 Algorithme

L’objectif est de déterminer le type d’anomalie (injection d’eau ou d’argon) dans les plus brefs délais avec peu de fausses alarmes et de localisations erronées. Après prétraitement, un test récursif de détection/localisation [7] a été réalisé pour chaque pas du temps, i.e. pour chaque hypothèse et pour chaque capteur. Sur la base d’erreurs résiduelles  $e_{k,b}$ ,  $e_{k,e}$  et  $e_{k,a}$  des modèles ARMA, on calcule les rapports de vraisemblance pour tester les deux hypothèses alternatives  $\mathcal{H}_e$  et  $\mathcal{H}_a$  contre l’hypothèse de base  $\mathcal{H}_b$  :

$$S_{k,e} = \frac{1}{2} \left[ \log \frac{\sigma_{b,2}^2 \sigma_{b,6}^2}{\sigma_{e,2}^2 \sigma_{e,6}^2} + \frac{e_{k,b,2}^2}{\sigma_{b,2}^2} + \frac{e_{k,b,6}^2}{\sigma_{b,6}^2} - \frac{e_{k,e,2}^2}{\sigma_{e,2}^2} - \frac{e_{k,e,6}^2}{\sigma_{e,6}^2} \right]$$

$$S_{k,a} = \frac{1}{2} \left[ \log \frac{\sigma_{b,2}^2 \sigma_{b,6}^2}{\sigma_{a,2}^2 \sigma_{a,6}^2} + \frac{e_{k,b,2}^2}{\sigma_{b,2}^2} + \frac{e_{k,b,6}^2}{\sigma_{b,6}^2} - \frac{e_{k,a,2}^2}{\sigma_{a,2}^2} - \frac{e_{k,a,6}^2}{\sigma_{a,6}^2} \right],$$

les fonctions de détection :

$$\begin{aligned} G_{k,e} &= \max \{0, G_{k-1,e} + S_{k,e}\} \\ G_{k,a} &= \max \{0, G_{k-1,a} + S_{k,a}\} \end{aligned}$$

et de localisation (classification) :

$$\begin{aligned} L_{k,e} &= G_{k,e} - G_{k,a} \\ L_{k,a} &= G_{k,a} - G_{k,e}. \end{aligned}$$

La règle d'arrêt à l'instant  $k$  est la suivante :

- on déclare que l'hypothèse  $\mathcal{H}_e$  est acceptée si les conditions suivantes sont satisfaites

$$G_{k,e} \geq h_d \quad \text{et} \quad L_{k,e} \geq h_l$$

- on déclare que l'hypothèse  $\mathcal{H}_a$  est acceptée si les conditions suivantes sont satisfaites

$$G_{k,a} \geq h_d \quad \text{et} \quad L_{k,a} \geq h_l$$

où les constantes  $h_d > 0$  et  $h_l > 0$  sont préalablement fixées.

### 3.3 Résultats expérimentaux

La procédure de détection/localisation séquentielle définie dans la section précédente a été appliquée à un certain nombre d'échantillons des données GV. Les paramètres du modèle ARMA du bruit  $\{a_1, b_1, \sigma^2\}_b$  ont été estimés à l'aide des premières 40 sec pour chaque échantillon. Les premiers tests donnent des résultats encourageants. Le comportement des fonctions de détection/localisation  $G_{k,e}$ ,  $G_{k,a}$ ,  $L_{k,e}$  et  $L_{k,a}$  est présenté sur la figure 4 dans le cas d'injection d'argon avec  $k_0 = 60$  sec.

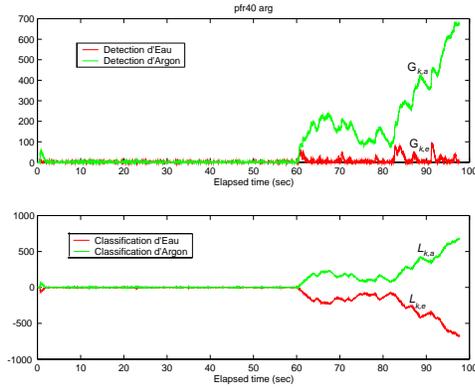


FIGURE 4 – Échantillon pfr40 arg : l'injection d'argon. Les fonctions de détection/localisation du test séquentiel.

## 4 Caractéristiques discriminantes

### 4.1 Approche retenue

À l'issue de la première partie de l'étude, la capacité de détection ne fait guère de doute. En revanche, la capacité de lo-

calisation montre que la réponse du système de surveillance aux injections d'eau n'est pas identique à la réponse aux injections d'argon. Pour analyser ces différences un très grand nombre d'options sont possibles. L'hypothèse de stationnarité du signal étant relativement bien vérifiée, les résultats d'une première étude [6] nous ont conduit à analyser le contenu spectral des signaux d'injection.

### 4.2 Caractérisation

La figure 5 représente le spectre d'amplitude normalisé moyenné des signaux d'injections d'argon et des signaux d'injections d'eau. La différence entre les spectres moyens est très

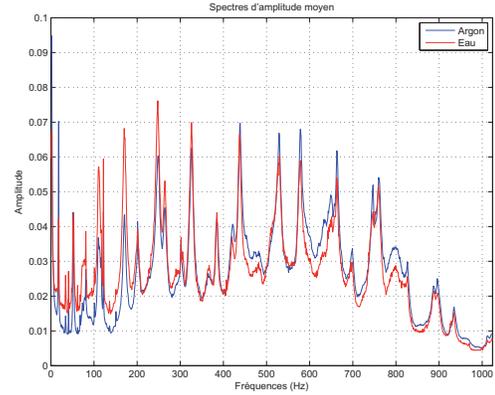


FIGURE 5 – Spectre d'amplitude normalisé moyenné des injections d'argon et des injections d'eau

faible. Toutefois la comparaison des spectres obtenus à partir des deux capteurs montre une très grande similarité. Nous pensons qu'ils correspondent à la réponse de la structure excitée par la réaction de l'eau ou de l'argon et que cette réponse est peu variable.

Une lecture plus poussée des spectres fait apparaître qu'en moyenne la réponse des sondes est plus forte dans les basses fréquences en cas d'injection d'eau alors qu'avec l'argon ce sont les composante hautes fréquences (au delà de 400Hz) qui sont relativement plus importantes. De plus, on observe que la disparité inter-spectre est non négligeable et semble plus importante que la différence eau-argon (figure 6). Ce constat semble contredire la conclusion de la première partie de l'étude.

Pour comprendre la capacité de discrimination observée précédemment, nous avons découpé, pour chaque capteur, les transitoires correspondants aux injections en 25 bandes de fréquences centrées sur chaque mode et calculé l'énergie normalisée dans chacune.

### 4.3 Classification

Afin de déterminer un sous ensemble d'attributs significativement discriminants, une analyse de la distribution des attributs a été réalisée. Elle a permis d'écarter 14 des 25 bandes

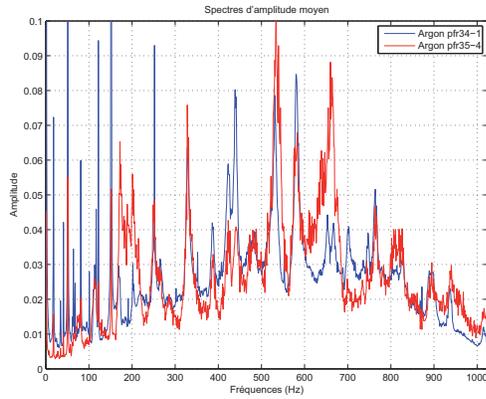


FIGURE 6 – Spectre d’amplitude normalisé moyenné de deux signaux d’injections d’argon différents

de fréquences pour lesquelles aucune différence notable n’apparaît. Pour identifier les attributs les plus discriminants parmi les 9 restant, nous avons cherché à réduire la dimension de cet espace de représentation tout en conservant une bonne capacité de discrimination.

Compte tenu du nombre relativement limité d’attributs (9 par capteur) et du fait que nous avons choisi de conserver les mêmes attributs pour chaque capteur, une méthode de recherche exhaustive a pu être mise en oeuvre aisément. La méthode consiste donc tout simplement à former toutes les combinaisons d’attributs possibles (au nombre de  $2^9 - 1$ ) et pour chacune d’elles à apprendre une règle de décision, évaluer ses performances et à identifier à partir de ces résultats les groupes d’attributs les plus performants.

L’apprentissage de la règle de décision a été réalisé à l’aide d’une machine à vecteurs supports (SVM) à deux classes [3], [1], [2]. Les fonctions noyaux  $K_h$  choisies pour les SVMs sont des fonctions gaussiennes. La fonction de décision déterminée dépend de deux paramètres ( $C, h$ ) qui sont optimisés sur un ensemble de couples candidats. Compte tenu du nombre d’exemples réduit, les performances ont été évaluées par la procédure de Leave One Out [4].

#### 4.4 Résultats expérimentaux

Espace	Bandes de fréquences retenue
$E_1$	(185, 224) - (490, 549) - (600, 680)
$E_2$	(90, 119) - (185, 224) - (600, 680)
$E_3$	(90, 119) - (160, 184) - (430, 489)
$E_4$	(65, 89) - (185, 224) - (600, 680)
$E_5$	(45, 64) - (185, 224) - (600, 680)

TABLE 1 – Sous-ensembles d’attributs retenus

Les meilleurs résultats de classifications obtenus aboutissent à ne commettre aucune erreur de classification, soit  $\hat{P}_e = 0$ .

Plusieurs sous-espaces aboutissent à ce résultat. Parmi ceux-ci, les espaces de plus petite dimension comportent tous 3 attributs par capteur (soit 6 au total). La table 1 donne les bandes

de fréquences pour lesquelles ces résultats sont obtenus.

Ces résultats confirment qu’en dépit de la grande ressemblance des spectres, il est possible de clairement différencier les injections d’argon des injections d’eau. Ils montrent notamment que les distributions conjointes des attributs intervenant dans les 5 sous-espaces sont significativement différentes d’une classe à l’autre.

## 5 Conclusion

Les travaux présentés montrent la possibilité de détecter une réaction dans le sodium à partir des sondes acoustiques. Le délai de détection garantissant un taux de détection élevé n’a pas pu être évalué compte tenu du faible volume de données et des incertitudes sur les instants d’injections (le retard commande-injection est très variable). Ils montrent aussi que les émissions acoustiques des injections d’eau et d’argon sont significativement différentes au moins autour de certaines fréquences. L’origine de ces différences reste un problème de recherche ouvert.

## Remerciements

Ces travaux ont été réalisés avec l’aide financière du GIS Sûreté, Surveillance et Sécurité des Grands Systèmes que nous tenons tout particulièrement à remercier.

## Références

- [1] B.E. Boser, I.M. Guyon, and V.N. Vapnik. Training algorithm for optimal margin classifiers. pages 144 – 152, Pittsburgh, PA, USA, 1992.
- [2] C. Cortes and V.N. Vapnik. Support-vector networks. *Machine Learning*, 20(3) :273 – 297, 1995.
- [3] N. Cristianini and J. Shawe-Taylor. *An Introduction to Support vector machines and other kernel-based learning methods*. Cambridge University Press, 2000.
- [4] J. Kittler Devijver, P. A. *Pattern Recognition : A Statistical Approach*. Prentice-Hall, London, 1982.
- [5] P. Grivelet L. Oriol. Analyse des enregistrements acoustiques des essais d’injections pfr en vue de la caractérisation de la réaction sodium-eau. Technical Report 58p, CEA, juin 1996.
- [6] S. Eymery L. Oriol, R. Demarais. Base de données numérique des enregistrements acoustiques des injections d’argon et d’eau faites dans un gv de pfr. Technical Report 50p, CEA, décembre 1997.
- [7] I. Nikiforov. A simple recursive algorithm for diagnosis of abrupt changes in random signals. *IEEE Trans. Inform. Theory*, 46(7) :2740–2746, November 2000.
- [8] L. Oriol. Analyse basse fréquence des essais pfr. Technical Report 35p, CEA, décembre 1997.