

**TRAITEMENT DU SIGNAL ET DE L'IMAGE
EN SURVEILLANCE ET CONTROLE
A ELECTRICITE DE FRANCE**

Bruno GEORGEL *
Dominique GARREAU **

* Electricité de France, DER/SDM, 6 quai Watier, BP 49, 78401 CHATOU cedex

** Kurtosis Ingénierie s.a., 27 av. de la Constellation, BP 8295, 95802 CERGY-PONTOISE cedex

RÉSUMÉ

Le traitement de l'information véhiculée par des signaux et des images est aujourd'hui l'un des fondements de la qualité des dispositifs de surveillance et de contrôle des installations industrielles. Ainsi, des techniques de Traitement du Signal ou de l'Image (TSI), telles que la détection ou le filtrage adaptatifs ou encore la reconstruction 3D, deviennent nécessaires dès lors que l'on doit mettre en évidence et reconnaître des anomalies de fabrication ou de fonctionnement. Cette communication est l'occasion de préciser la problématique du TSI industriel et d'en illustrer les implications, en décrivant brièvement les études et les projets en cours de réalisation à EDF.

1. INTRODUCTION

Stimulée par la concurrence internationale et les grands défis technologiques, l'industrie mise sur la qualité. Electricité de France n'échappe pas à la règle en mettant en priorité sûreté des installations, sécurité des personnels, disponibilité des moyens de production et innocuité envers l'environnement.

Ces objectifs ne peuvent être atteints qu'en surveillant en permanence les matériels, en contrôlant les matériaux, en sachant diagnostiquer leurs maladies éventuelles et en organisant une maintenance optimale.

La surveillance est rentable : une étude d'EDF montre que les économies réalisées pendant les arrêts de tranches (c.à.d. les surplus de production) dépassent les dépenses en étude et en réalisation de matériel de surveillance. L'évolution constatée depuis quelques années, à savoir le nombre de tranches nucléaires et les possibilités nouvelles d'automatiser la surveillance, ne feront que confirmer ce bilan favorable.

Par ailleurs, à moyen terme, la meilleure connaissance de certains phénomènes physiques ou la validation de machines prototypes nécessitent des campagnes de mesures spécifiques, qu'il convient d'analyser. Des efforts importants portent sur l'amélioration des modèles; le Traitement du Signal et de l'Image (TSI) est alors un trait d'union entre des connaissances a priori et des observations réelles forcément limitées.

L'information est véhiculée par des signaux ou des images, issus de capteurs appropriés. Leur traitement, en ligne ou en différé suivant les cas, est bien sûr une tâche indispensable, qui peut être délicate dans l'ambiance industrielle.

ABSTRACT

Monitoring and inspecting industrial plants now requires efficient information processing of the observed signals and images. So Digital Signal and Image Processing (DSIP) techniques like adaptive detection and filtering or 3D reconstruction become necessary when ones have to discover and recognize manufacturing or running defaults. In this paper we present the issues of DSIP in the industrial field in describing examples of studies and projects under development at Electricité de France.

Le diagnostic, quant à lui, représente la part "experte" du travail et peut rarement se satisfaire de fonctions de traitement seules : une couche d'informatique avancée (IA) est nécessaire pour tenir compte du caractère diffus, incomplet ou flou des connaissances et des modes de raisonnement des experts. Cet aspect du problème ne sera pas abordé ici.

En limitant notre propos à la surveillance et au contrôle — ces deux fonctions ne diffèrent en fait que par l'ordre de grandeur des temps de réponse —, nous allons expliciter quelques applications qui ont besoin de traitement du signal ou de l'image. Notre but est de présenter des utilisations industrielles, éventuellement en cours de développement, de souligner quelques-uns de leurs traits propres et de susciter, le cas échéant, de nouvelles recherches dont elles seraient le prétexte.

2. LES SITUATIONS RENCONTREES

2.1 Les données

De façon générale, le TSI à EDF opère sur un large ensemble de mesures en tous genres : signaux de pression, température, débit, déformation, déplacement, accélération, flux neutronique..., images vidéo et ultrasons, radiographies etc... dont on souhaite extraire l'information utile. Malheureusement, du fait même de la complexité des mécanismes physiques en jeu (par exemple dans un réacteur), les données expérimentales dont on dispose sont difficilement interprétables.



2.2 Problématique du TSI industriel

Outre la diversité évoquée précédemment et qui conduit à adopter un point de vue de généraliste, on doit souvent compter sur un volume de données très important. Ce dernier point provient du nombre de capteurs instrumentés (les essais mettent en jeu plusieurs voies de mesure) et de la durée d'observation (on souhaite souvent observer des phénomènes "rapides" sur des temps d'observation longs).

On dispose, nous l'avons vu, de données multidimensionnelles et volumineuses, mais d'un nombre insuffisant de capteurs étant donné la complexité des géométries et des phénomènes, et pas de véritable antenne au sens habituel du TSI. L'échantillonnage spatial est souvent bien insuffisant et limite la marge de manoeuvre sur les méthodes envisageables.

L'emploi des techniques classiques est fondé sur des hypothèses fortes : linéarité et invariance dans le temps des systèmes, stationnarité des observations. Ces hypothèses sont souvent mises en défaut et, de toutes façons, en détection, c'est souvent une rupture plus ou moins brutale de caractéristiques statistiques qui témoigne de la présence d'un événement intéressant ou de modifications de l'environnement. On se doute que les signaux industriels ont des spectres variés, à large bande dans certains cas, et qu'ils sont tous bruités. Certaines caractéristiques sont moins connues, comme la nature "complexe" des signaux courants de Foucault.

En image, du fait du très grand nombre de contrôles —plusieurs dizaines de milliers de clichés radiographiques sont pris chaque année dans les centrales EDF—, les volumes de données sont énormes. Les images recueillies lors des contrôles sont souvent peu contrastées et sont affectées de bruits variés (grain, reflets d'éclairage, gradient de fond, etc...).

On ne dispose pas toujours de modèles de connaissance analytiques ou numériques suffisants. Une partie des connaissances est disponible sous forme de retour d'expérience et d'heuristiques. Ceci rend indispensable l'utilisation conjointe du TSI et d'autres approches (ex : systèmes experts).

Le TSI industriel est bien souvent victime de situations figées indépendamment de ses contraintes propres. En fait il est, la plupart du temps, un "recours" quand les solutions de bon sens sont inopérantes. Ceci n'a rien d'anormal a priori mais conduit à demander "trop" au TSI, par exemple de compenser une méconnaissance des phénomènes ou une instrumentation trop réduite. Les mesures effectuées ont fréquemment un caractère passif alors même qu'un grand nombre de problèmes de surveillance et de diagnostic sont en fait des problèmes inverses. Ceci est le cas dès que la décision porte sur l'origine des événements anormaux, sans que l'on dispose pour autant de mesures directes des excitations. On doit alors tenter de déconvoluer sans avoir une garantie d'unicité de la solution.

Enfin, même si des campagnes de mesures sont possibles, les banques de signaux et d'images restent pauvres en anomalies réelles (et heureusement!). Ceci rend délicate la mise au point de procédures de discrimination et de reconnaissance. Pour celle-ci, la référence est d'une part l'expert qui diagnostique les signaux et d'autre part la banque d'exemples... et c'est tout.

3. RECHERCHE ET DEVELOPPEMENT

3.1 Diagnostic des tubes de Générateur de Vapeur (GV) par courants de Foucault

Les GV sont des ensembles cruciaux des centrales nucléaires en ce sens qu'ils réalisent l'interface entre circuit primaire et circuit secondaire : ils sont donc particulièrement surveillés.

Leur contrôle est effectué par sondes à courants de Foucault, dont le principe est d'induire des courants électriques dans l'épaisseur du tube de GV. Toute modification de l'intégrité ou de l'environnement de ce tube est vue dans le signal délivré par la sonde lors de son déplacement. Chaque tube fournit environ 3 M-octets et une tranche nucléaire comprend 10 000 tubes. La nécessité évidente de compression se heurte à des pratiques nées avant l'informatisation et au souhait "légal" de conserver les originaux des contrôles, à toutes fins utiles.

Ces signaux sont complexes (il s'agit d'une mesure d'impédance en chaque point du tube), non stationnaires et bruités. Le bruit lui-même a une composante aléatoire (électronique) et une composante à spectre de raies (métallurgique).

Plusieurs études ont été menées pour restaurer les signaux des parties droites des tubes : depuis le filtrage numérique passe-bande jusqu'au filtre adaptatif, en passant par le corrélo-filtre (1). L'élimination des défauts externes est obtenue aussi bien par une version itérative du corrélo-filtre que par un filtre MCR (les deux méthodes utilisent une référence de bruit). Ce n'est pas le cas pour les défauts internes qui doivent être détectés et prédits de façon à reconstituer une référence bruit seul.

La détection de défauts a donné matière au développement d'un filtrage adaptatif en treillis pour des signaux complexes, suivi d'un test sur le franchissement d'une ellipse par l'erreur de prédiction linéaire (2). Dans ce problème particulier, on veut détecter des défauts mais pas les plaques entretoises : un algorithme de gradient modifié se montre supérieur aux moindres carrés récursifs qui "réagissent trop vite".

Une fois le bruit atténué, il faut être capable de classer les signaux détectés : est-ce un défaut et si oui lequel ? Plusieurs approches ont été essayées : reconnaissance de formes statistique, syntaxique et par réseaux de neurones.

Plus récemment, EDF a lancé le projet EXTRACSION qui regroupera différents modules de traitement dans un ensemble semi-automatique de diagnostic des parties droites, un système expert choisissant et réglant les algorithmes selon le contexte (3).

3.2 Vibration des ailetages de turbine (4)

La compréhension des mécanismes d'excitation des ailetages de turbines à vapeur du parc EDF a fait l'objet de travaux théoriques et expérimentaux. Ces derniers ont montré l'intérêt de la modélisation paramétrique des signaux vibratoires mesurés et la nécessité d'employer des techniques de TSI valables dans un contexte bruité et non stationnaire ou tenant compte de périodicités liées à la rotation de la machine (cyclostationnarité).

3.3 Bruit neutronique (5)

Le concept de surveillance n'est pas uniquement lié à des composants qui concourent à la production d'électricité : on peut aussi chercher à surveiller une instrumentation, qui elle-même délivre des mesures sur un composant. C'est le cas de cette étude qui concerne les "doigts de gant" de l'instrumentation interne des réacteurs nucléaires.

Le phénomène incriminé est la vibration d'origine hydroélastique : les chocs endommagent l'instrumentation. Au lieu d'implanter des accéléromètres, on a pensé analyser la partie fluctuante du flux neutronique mesuré par les chambres à fission placées au bout des doigts de gant : c'est le bruit neutronique.

L'analyse spectrale, classique quand on s'intéresse aux vibrations, fait apparaître une forme générale en "1/f", avec des pics à des fréquences changeantes ; la détection des anomalies spectrales est très délicate, même par les physiciens : les pics sont souvent proches de phénomènes autres que celui qui est surveillé et ressortent mal du bruit de fond. Une analyse en composantes principales d'une campagne d'essais à la centrale 900 MW de Chinon montre l'importance pour l'interprétation de deux grandeurs: la forme du spectre et son niveau moyen.

Ces premiers résultats ont conduit à deux études complémentaires :

- la mise au point d'un algorithme de détection de pics dans le domaine spectral. On estime une référence bruit seul sur le spectre, au moyen d'un algorithme à trou et à tri, et on compare l'échantillon courant à cette valeur (fréquentielle) de référence. L'utilisation des spectres en dB permet de prendre en compte la convolution entre signal et bruit (6).

- une investigation sur la dimension fractale des signaux neutroniques et son intérêt pour interpréter les spectres en $1/f^m$ (7).

3.4 Reconstruction 3D en radiographie (8),(9)

De nombreux clichés radiographiques sont pris dans les centrales : en particulier, les coudes moulés du circuit primaire sont régulièrement contrôlés à l'aide d'une source radioactive introduite dans la tuyauterie. Quelques clichés sont numérisés fournissant ainsi des images que l'on peut traiter.

Le processus d'acquisition des clichés est extrêmement contraint : pour des raisons d'exiguité, de durée d'exposition et de géométrie, la source ne prend que quelques positions sur une trajectoire rectiligne au centre de la tuyauterie, fournissant ainsi 3 (au maximum 5) projections, dont les angles de visée diffèrent de 20° environ.

Localiser et surtout préciser l'orientation d'un défaut dans cette pièce est pourtant fondamental ; un défaut volumique et un défaut linéaire n'ayant pas du tout le même caractère de gravité potentielle. En conséquence, le problème inverse est extrêmement "mal posé". L'introduction d'informations a priori est une condition sine qua non de succès. L'approche adoptée est celle d'une reconstruction algébrique ART à partir de 3 vues, intégrée dans une procédure itérative utilisant un modèle markovien et une restauration bayésienne.

Cette méthode, nouvelle en CND et consommatrice de temps-machine, a pour l'instant été essayée avec des projections simulées et bruitées, ainsi qu'avec des projections issues d'un banc d'essai (avec un défaut simple dans une éprouvette métallique).

4. PROJETS INDUSTRIELS

4.1 Le P.S.A.D.

Le P.S.A.D. (Poste de Surveillance et d'Aide au Diagnostic) est un système qui sera utilisé dans un futur proche pour la surveillance des centrales nucléaires exploitées par EDF. Comme son nom l'indique, ce système a deux objectifs principaux : détecter des événements anormaux et fournir aux exploitants une aide efficace pour diagnostiquer l'origine de l'anomalie éventuelle. Les matériels faisant l'objet de cette surveillance sont les pompes primaires (fonction SPP), le circuit primaire (fonction "Détection de Corps Errants", DCE) et le groupe turbo-alternateur (fonction SGTA). Ces composants ont été choisis pour leur importance vis-à-vis de la sûreté et de la disponibilité des tranches. La structure du P.S.A.D. comporte quatre niveaux :

- un système de surveillance "temps réel" auprès de chaque composant surveillé (les signaux y sont numérisés),
- une puissance de stockage et de calcul au niveau de l'unité de production,
- un équipement complémentaire au niveau de la centrale,
- des postes de travail pour les experts nationaux.

Comme on le devine, il s'agit d'un système informatique puissant et distribué s'appuyant sur une architecture de réseaux local et national (10).

Les fonctions mises en jeu dans DCE sont essentiellement au nombre de deux: la détection et l'estimation.

La détection consiste, ici, à décider de l'existence d'une anomalie. Cette décision est menée graduellement, à partir de mesures faites dans le domaine temporel ou spectral, en combinant des décisions prises sur des signaux isolés (coïncidences). Des études en cours, à base de bancs de filtres, de blanchiment et de rapport de puissance, semblent montrer que l'on peut trouver une méthode plus robuste que celle du facteur de crête inspirée de l'analogique. La présence de plusieurs capteurs, qui voient le phénomène de choc sur la tuyauterie, incite à envisager un traitement global multi-dimensionnel, d'autant plus que le vrai défi est le régime de montée en puissance, pendant lequel le rapport S/B est très faible et qui permettrait un arrêt précoce de l'installation.

L'estimation permet d'extraire des caractéristiques à partir des signaux (bruts ou transformés) qui serviront lors de la phase de diagnostic. Des systèmes experts en cours de validation (DIVA et MIGRE) permettront de proposer un diagnostic à partir des données traitées et de modes de raisonnement.

4.2 Le système d'analyse d'images radiographiques ENTRAIGUES

ENTRAIGUES est un système d'aide à l'interprétation d'images : il vise le contrôleur-radiologue non spécialiste en traitement numérique. Son succès conditionnera grandement la percée ultérieure du traitement d'image. EDF réalise actuellement ce système qui comprendra :

- un numériseur de cliché à haute définition (50 micromètres),
- un micro-ordinateur sur lequel un logiciel simple d'emploi permettra à un contrôleur d'exécuter des algorithmes de traitement d'image.

Les radiogrammes de coudes sont des images difficiles : peu contrastées, affectées d'un bruit granulaire et d'un fond non homogène, elles nécessitent plusieurs améliorations successives. Chaque fois que c'était possible, nous avons utilisé des standards ou des outils largement répandus ; dans le cas contraire, des outils



spécialisés de traitement d'images ont été mis au point et intégrés au sein de différents menus :

- correction interactive de la dynamique, égalisation d'histogramme, seuillage, lissage par moyenne, filtrage par la médiane,
- mesure de niveau de gris, de profil, d'histogramme, de surface et de distance avec calibration possible,
- géométrie simple : zoom / réduction interpolés entiers ou fractionnaires, coupé / collé,
- aide à la visualisation : gestion des images, mise à plat pour réduire le gradient de fond, correction des effets du numériseur, filtrage morphologique,
- des procédures spécifiques pour l'interprétation des radiographies industrielles (traitement de fissures, de "retassures" — figure 1 — et visualisation double film par recalage sur amers).

5. CONCLUSION

Nous avons présenté plusieurs applications industrielles, à Electricité de France, dans lesquelles le Traitement du Signal et de l'Image joue — ou va jouer — un rôle déterminant. Ces applications concernent principalement la surveillance des installations et le contrôle des matériaux, bien que d'autres domaines, non abordés dans l'article, fassent aujourd'hui appel au traitement de l'information (intelligibilité des messages en ambiance bruitée, acquisition et analyse de textes et images en informatique documentaire, prévision des courbes de consommation d'électricité, étude de la houle, météorologie locale, cartographie...etc). Quelle est la problématique du TSI en milieu industriel ? c'est celle de l'ingénieur qui doit mettre au point des solutions, dans un environnement qui est ce qu'il est. Les méthodes qu'il connaît constituent sa boîte à outils, à lui de choisir la mieux adaptée.

Le recours à ces méthodes, latent depuis plusieurs années, commence à prendre une ampleur significative, au moment où EDF et ses partenaires industriels conçoivent des systèmes de surveillance ambitieux, dont le traitement des signaux et images est d'emblée partie intégrante. Le temps est encore loin néanmoins où l'on pourra embrasser globalement le champ très vaste qui s'étend de la physique des phénomènes à leur diagnostic automatique et où la part de traitement, étudiée dès le début, sera équilibrée avec celle de la prise d'information (quel capteur choisir ? où l'implanter ?...), de l'instrumentation (quelle capacité de traitement dans le capteur ?) et de l'architecture du système (où fusionner les informations ? et comment ?...).

A l'heure actuelle, on pourrait dire que l'ensemble des problèmes de traitement de l'information liés à la surveillance et au contrôle sont extrêmement "mal posés", au sens usuel du terme : pour diverses raisons que nous avons explicitées, tout l'effort d'extraction de l'information est demandé au traitement numérique. Beaucoup de techniques mises au point pour les télécoms, les systèmes d'armes ou la prospection pétrolière peuvent naturellement servir, avec les adaptations adéquates. Constatons au passage que, comparé à la foison d'algorithmes et de variantes régulièrement publiés, très peu sont effectivement implantés dans des systèmes opérationnels.

Mais il nous semble que le domaine de l'énergie, qui s'ouvre à ces méthodes, lance des défis supplémentaires aux chercheurs, en les plaçant d'emblée sur le terrain peu confortable des "ni-ni" : ni stationnaire, ni blanc, ni gaussien... C'est la source de nouvelles études théoriques, pour peu que les canaux (bi-directionnels) de

communication existent et fonctionnent, entre utilisateurs et chercheurs. Les succès du GRETSI et du Groupement de Recherche TdSI nous incitent à avoir confiance dans l'avenir.

REFERENCES

- (1) Y.POUPEAU Amélioration du rapport S/B des signaux Courants de Foucault, thèse de l'université P.et M. Curie, 1988
- (2) A. TUBIANA Détection de défauts par filtrage en treillis des signaux courants de Foucault, mémoire CNAM, 1990
- (3) B.GEORGEL Traitement des signaux Courants de Foucault, journées TdS en Mécanique CETIM/CNRS, 1990
- (4) D. GARREAU Contribution à l'étude des vibrations d'un ailetage basse pression d'une turbine à vapeur, thèse de l'INP Toulouse, 1987
- (5) P. FLANDRIN, D.GARREAU, C. PUYAL Improving monitoring of PWR electrical power plants "in core" instrumentation, ICASSP Glasgow 1989
- (6) D. GARREAU, M. BOUVET A normalization technique for non additive noise, ICASSP Albuquerque 1990
- (7) P. FLANDRIN et al. Caractérisation des bruits en 1/f, rapport final convention EDF 2J1407, 1990
- (8) C.KLIFA Reconstruction 3D à partir d'un nombre limité de projections, thèse de Télécom Paris, 1991
- (9) B.LAVAYSSIERE, C.KLIFA Reconstruction 3D de défauts en radiographie industrielle, colloque GRETSI, 1991
- (10) J.M.MAZALERAT et al. PSAD, an integrated tool for global vibratory and acoustic surveillance of EDF nuclear plants in the near future, colloque SMORN 6, Gatlinburg USA, 1991
- (11) B. LAVAYSSIERE, F.Y. BRIAND, C. KLIFA Analyse multidimensionnelle en radiographie industrielle, 1^{er} COFREND, Nice 1990

EXTRACSION et ENTRAIGUES sont des marques déposées par EDF.

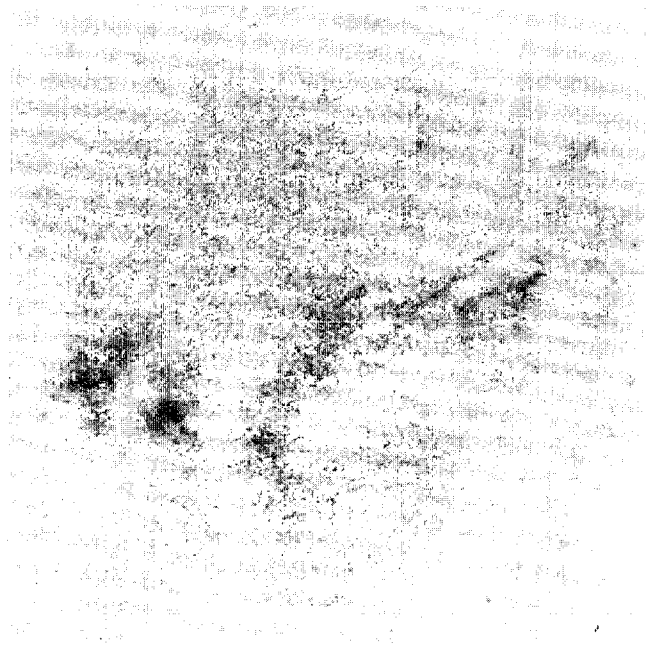


figure 1 : radiogramme traité par mise à plat et modification logarithmique de contraste (ENTRAIGUES).