

Projet SIGMA2

Signaux, modèles et algorithmes

Rennes

THÈME 4A



*R*apport
d'Activité

1999

Table des matières

1	Composition de l'équipe	3
2	Présentation et objectifs généraux	4
3	Fondements scientifiques	6
3.1	Identification et systèmes adaptatifs	6
3.2	Surveillance et diagnostic par des techniques du traitement statistique du signal	11
4	Domaines d'applications	13
4.1	Analyse de structures vibrantes en ambiance de travail	13
4.2	Télécommunications : accès partagé au canal, protection du canal, et diagnostic de pannes en gestion de réseaux	15
5	Logiciels	16
5.1	Nonlinear Modelling Matlab Toolbox	16
6	Résultats nouveaux	17
6.1	Surveillance et diagnostic	17
6.1.1	Surveillance de systèmes non-linéaires dynamiques	17
6.1.2	Méthodes de sous-espace, application à la surveillance de structures soumises à vibrations en opération	18
6.1.3	DéTECTABILITÉ DE PANNES	19
6.2	Systèmes hybrides	20
6.2.1	Diagnostic dans les systèmes distribués	21
6.2.2	Diagnostic de systèmes hybrides continu/discret	22
6.3	Codes correcteurs et modèles graphiques	22
6.4	Détection et estimation	23
6.4.1	Estimation spectrale	23
6.4.2	Sélection de variables et régression robuste	23
6.5	Modèles de Markov cachés généraux	24
6.6	Imagerie à travers la surface de l'océan	25
6.7	Traitement de la parole et du langage	25
6.7.1	Indexation sonore	26
6.7.2	Vérification du locuteur	26
6.7.3	Reconnaissance de la parole	27
6.7.4	Analyse de données textuelles	27
6.8	Manipulation de connaissances	28
7	Contrats industriels (nationaux, européens et internationaux)	29
7.1	Diagnostic de pannes dans les réseaux de télécommunications — Projet exploratoire RNRT Magda	29
7.2	Détection précoce et localisation de défauts dans des appareils électriques — Contrat Schneider Electric	30

7.3	Identification dynamique du comportement d'un véhicule routier — Contrat Renault	30
7.4	Analyse de structures vibrantes — Projet Eureka Sinopsys	30
7.5	Indexation sonore — Projet pré-compétitif RNRT Agir	31
7.6	Gestion d'archives audio-visuelles — Projet Esprit Divan	31
7.7	Vérification du locuteur — Projet Telematics Picasso	32
7.8	Reconnaissance du locuteur — Contrat Bull	32
7.9	Commande floue de bâtiments solaires — Projet Joule-Thermie	32
8	Actions régionales, nationales et internationales	33
8.1	Actions de recherches coopératives (Arc)	33
	8.1.1 Analyse à court et moyen terme de la variabilité du rythme cardiaque	33
	8.1.2 Système générique de reconnaissance de parole — Sirocco	33
8.2	Actions régionales	33
8.3	Actions nationales	34
8.4	Actions européennes	34
8.5	Actions internationales	34
8.6	Visites, et invitations de chercheurs	35
9	Diffusion de résultats	35
9.1	Animation de la communauté scientifique	35
9.2	Actions d'enseignement	36
9.3	Participation à des colloques, conférences invitées, tutoriels, cours, etc.	36
10	Bibliographie	37

1 Composition de l'équipe

Responsable scientifique

François Le Gland [DRDR Inria, à partir du 8 novembre 1999]

Assistante de projet

Marie-Noëlle Georgeault [TR Inria]

Personnel Inria

Albert Benveniste [DR]

Frédéric Cérou [CR, à partir du 1^{er} juillet 1999]

Éric Fabre [CR]

Laurent Mevel [CR, à partir du 1^{er} décembre 1999]

Qinghua Zhang [CR]

Personnel CNRS

Michèle Basseville [DR]

Frédéric Bimbot [CR]

Personnel université de Rennes 1

Jean-Jacques Fuchs [professeur]

Annie Morin [maître de conférences]

Personnel Insa

Pierre-Yves Glorennec [professeur, jusqu'au 30 juin 1999]

Collaborateur extérieur

Bernard Delyon [professeur à l'Irmar]

Ingénieurs experts

Bruno Jacob

Laurent Mevel [jusqu'au 31 mars 1999]

Didier Zugaj [jusqu'au 31 août 1999, en commun avec le projet Vista]

Chercheurs doctorants

Armen Aghasaryan [bourse Inria, jusqu'au 8 février 1999]
Samy Abbes [bourse MENRT, à partir du 1^{er} octobre 1999]
Laurent Benaroya [bourse MENRT, à partir du 1^{er} octobre 1999]
Raphaël Blouet [bourse Inria]
Arnaud Clavel [bourse Cifre/Renault, à partir du 1^{er} février 1999]
Alain Gauthreau [bourse Ademe, jusqu'au 30 juin 1999]
Arnaud Guyader [bourse MENRT]
Jean-Luc Le Calvez [bourse MENRT, jusqu'au 31 janvier 1999]
Elizabeth Margaglio [bourse PCP, université Simon Bolivar, jusqu'au 11 mai 1999]
Nicolas Moal [bourse MENRT, jusqu'au 31 octobre 1999]
Nadia Oudjane [bourse MENRT/Onera]
Rodolphe Priam [bourse MENRT, à partir du 1^{er} octobre 1999]
Mouhamadou Seck [bourse Inria]
Benjamin Torno [bourse MENRT]
Laurent Tromp [assistant moniteur normalien, jusqu'au 31 août 1999]
Aiping Xu [bourse Inria, à partir du 1^{er} octobre 1999]

Chercheurs post-doctorants

Ivan Magrin-Chagnolleau [à partir du 15 octobre 1999]
Laurie Ricker [à partir du 1^{er} septembre 1999, en commun avec le projet Pampa]
Mark Smith [à partir du 1^{er} septembre 1999, en commun avec le projet Pampa]

2 Présentation et objectifs généraux

Le projet se centre sur le développement de méthodes de type «traitement de signal» pour l'observation et l'analyse des systèmes stochastiques. Les problèmes sont ici abordés sous les angles de la modélisation et de l'identification, ainsi que de la surveillance et du diagnostic.

Les applications considérées concernent essentiellement la surveillance de systèmes industriels (maintenance conditionnelle, surveillance de réseaux, etc.), mais également l'analyse du signal audio-fréquence, la reconnaissance de la parole et du locuteur, le traitement du signal radar. Les domaines théoriques abordés ont trait aussi bien aux probabilités et statistiques qu'aux systèmes hybrides non-linéaires.

Identification et systèmes adaptatifs. Les systèmes entrées/sorties linéaires ont été étudiés pendant des décennies et ont des propriétés parfaitement connues, aussi bien en ce qui concerne les systèmes déterministes que les systèmes stochastiques. Leur prédominance ne doit pas faire oublier qu'il est rare qu'un système réel ait un comportement linéaire sur tous ses points de fonctionnement et que les modélisations non-linéaires seront de plus en plus attractives.

Les méthodes les plus répandues actuellement pour l'estimation de relations non-linéaires sont basées sur les techniques de réseaux de neurones, d'ondelettes, ou de logique floue. Les difficultés rencontrées lors de l'utilisation de ces méthodes sont liées à :

- l'introduction des connaissances a priori,
- l'apprentissage automatique,
- la mesure de la qualité de l'approximant.

L'avantage des méthodes statistiques d'ondelettes est d'introduire une démarche *rationnelle* d'approximation de fonction. L'approche par les méthodes issues de la théorie des ensembles flous bénéficie en revanche de leur caractère opérationnel dans de nombreuses situations pratiques, car elles s'avèrent souples et bien acceptées par les utilisateurs.

L'étude des systèmes non-invariants dans le temps conduit à l'utilisation des algorithmes dits adaptatifs. L'approche non-paramétrique que nous avons suivie permet de compléter de manière efficace l'approche paramétrique traditionnelle en augmentant l'autonomie des systèmes.

Une autre forme de non-linéarité est le caractère «hybride» d'un système (présence de variables de nature différente, d'échelles de temps distinctes,...). L'application considérée pour le moment est le filtrage d'alarmes dans les réseaux de télécommunication. Ce point est abordé dans le projet par l'étude d'une forme particulière de réseaux de Petri stochastiques.

Surveillance et diagnostic. Les travaux concernant la surveillance d'installations industrielles sont étroitement associés aux travaux sur la détection de ruptures de modèles. L'étude des changements dans les modèles dynamiques de signaux et systèmes, avec prise en compte des divers problèmes de détection, d'estimation et de diagnostic de tels changements, intervient dans de nombreux problèmes d'Automatique et de Traitement du Signal : segmentation de signaux et d'images, en vue de la reconnaissance ; détection de pannes dans les systèmes, pour la sûreté de fonctionnement.

L'importance de cette problématique sur le plan industriel tient à ce que, ces dernières années, dans un grand nombre d'applications, est apparue une demande croissante en matière de remplacement des politiques de maintenance systématique par des stratégies de maintenance conditionnelle, basée sur la surveillance en continu de l'évolution du système considéré. Dans ce contexte, nous avons montré qu'une solution possible et fructueuse consiste en la détection précoce de déviations faibles par rapport à une caractérisation du système en fonctionnement usuel (sans excitation artificielle, sans ralentissement ni arrêt de machine). Le projet a ainsi élaboré une *démarche générale de surveillance et diagnostic*, basée sur la surveillance en continu de l'évolution du système considéré (machine ou structure ou procédé), afin d'anticiper un dysfonctionnement avant qu'il n'arrive. Cette démarche permet, pour une large classe de modèles, la conception systématique des algorithmes de surveillance et diagnostic : notre méthode permet d'associer, à tout algorithme adaptatif d'identification d'un modèle paramétrique, un algorithme de surveillance déclenchant des alarmes «globales», de manière précoce si besoin est, et un algorithme de diagnostic fournissant les causes les plus probables de l'alarme globale déclenchée. La méthode de conception repose sur l'approche statistique locale, qui est une étude de sensibilité d'un «résidu» vis-à-vis des pannes, relativement aux incertitudes et aux bruits divers.

3 Fondements scientifiques

Résumé : *Le projet s'intéresse aux techniques de modélisation, à partir de principes physiques, mais surtout à partir de données d'observation. Les problèmes centraux sont donc l'estimation et l'identification, mais aussi la validation de modèle, le test et le diagnostic, qui permettent de reconnaître et d'expliquer un désaccord entre modèle et mesures. Ces questions sont examinées sur différents types de modèles de systèmes dynamiques : linéaires, non-linéaires, et, plus récemment, hybrides. Nous avons choisi de détailler les deux points ci-après.*

3.1 Identification et systèmes adaptatifs

Mots clés : identification, système adaptatif, approximation stochastique, poursuite, paramétrique, non-paramétrique.

Glossaire :

Système adaptatif Se dit d'un système capable de réajuster son comportement en réaction à des modifications graduelles de son environnement.

Paramétrique et non-paramétrique On parle de modélisation paramétrique lorsque le modèle est caractérisable par un vecteur de dimension finie (et pas trop grande en pratique), et de modélisation non-paramétrique lorsque cela n'est pas le cas.

Résumé : *On se donne une suite d'observations $(Y_k)_{k>0}$ de loi caractérisée par un paramètre inconnu $\theta^* \in \Theta$. Le problème de l'identification paramétrique consiste à retrouver le paramètre inconnu θ^* à partir de la donnée d'une suite d'observations $(Y_k)_{k>0}$ gouvernée par ce paramètre.*

L'identification peut être «hors-ligne», ou «non récursive». Dans ce cas, on se donne un échantillon $(Y_k)_{0<k\leq N}$ de longueur finie N , et on cherche à construire un estimateur $\hat{\theta}_N$, c'est-à-dire une fonction de l'échantillon $(Y_k)_{0<k\leq N}$ à valeurs dans Θ . Les questions qui se posent sont alors : lorsque N tend vers l'infini, 1) $\hat{\theta}_N$ converge-t-il vers le vrai paramètre θ^ ? 2) si oui, à quelle vitesse ? Existe-t-il une borne optimale pour cette vitesse, borne qui dépend du vrai paramètre θ^* inconnu, et qui permet de parler de l'optimalité d'un estimateur ? Sait-on construire des estimateurs optimaux ?*

L'identification peut être «en-ligne», ou «récursive». Dans ce cas, on lit à la volée l'échantillon $(Y_n)_{n>0}$, et l'on construit récursivement une suite d'estimateurs $\hat{\theta}_n$. Cette suite est en général calculée incrémentalement, ce qui signifie que $\hat{\theta}_n$ est calculé en fonction de $\hat{\theta}_{n-1}$ et des nouvelles données reçues. On parle alors souvent d'approximation stochastique, ou de système adaptatif. Outre les questions précédentes, on se pose alors le problème de la poursuite : supposons que le vrai paramètre θ^ , au lieu d'être fixe, soit «lentement» variable, est-il possible que la suite d'estimateurs $\hat{\theta}_n$ poursuive les variations du vrai paramètre θ^* ? Nous avons, au cours des dix dernières années, apporté diverses contributions sur l'ensemble de ces questions, et tout récemment sur le problème de la poursuite.*

Parfois, le paramètre à estimer est un vecteur de grande dimension. Dans ce cas, le point de vue précédent est inopérant et l'approche que nous avons considérée jusqu'à présent est plus spécifiquement celle de l'estimation non-paramétrique (ou estimation fonctionnelle). Comme le nombre de paramètres à estimer est infini dans ce cas, la classe de modèles envisageable est, d'un point de vue théorique, un espace de dimension infinie, et des algorithmes différents doivent être mis en œuvre sur la base de considérations statistiques. Reliés à ce point de vue, on trouve également les réseaux de neurones et la logique floue. Nous avons, sur ces questions, apporté des contributions tant mathématiques que sous la forme de propositions d'algorithmes, en particulier dans le cas difficile où les observations sont elles-mêmes des vecteurs de grande dimension (on peut aller jusqu'à quelques milliers).

Le problème général de l'identification tel que nous l'approchons est le suivant : décrire au mieux une relation entrées/sorties, $u \longrightarrow y$, à partir de l'observation d'une séquence d'apprentissage $(u_1, y_1, u_2, y_2, \dots)$. La mesure de la qualité de la modélisation dépend de l'usage qui en est fait ensuite (surveillance, prédiction, ...).

L'approche paramétrique

Une phase de modélisation précède l'identification pour restreindre l'espace de recherche à un espace de dimension finie. Pour fixer les idées, partons du paradigme suivant : une classe de modèles assez large de la forme

$$y_n = f(\theta, y_{n-1}, u_n, u_{n-1}) + e_n \quad (1)$$

où e_n est un bruit blanc et $f(\theta, \cdot)$ une famille de fonctions paramétrées par θ , déterminées à l'étape de modélisation. L'algorithme théoriquement le plus simple est le maximum de vraisemblance, qui estimera θ à partir de N données, par la formule (on suppose e_n gaussien et les e_n indépendants) :

$$\hat{\theta}_N = \arg \min_{\theta} \sum_{n=1}^N (y_n - f(\theta, y_{n-1}, u_n, u_{n-1}))^2.$$

Une approche de ce type, pour pouvoir s'adapter à de nombreuses applications, doit être améliorée dans les directions suivantes :

- récursivité : possibilité de calculer $\hat{\theta}_{N+1}$ simplement à partir de $\hat{\theta}_N$; ceci se fait au prix de certaines approximations dont le coût doit être d'un ordre de grandeur inférieur à l'erreur d'estimation ($1/\sqrt{N}$) ;
- adaptativité : il arrive que le vrai paramètre θ varie au cours du temps (par exemple le transfert d'un canal radio-mobile) ; un bon algorithme doit être capable de « poursuivre » cette valeur.

Une autre difficulté est la pauvre qualité de l'estimation lorsque le paramètre est de grande dimension, et les méthodes utilisées en non-paramétrique sont une source importante d'inspiration.

C'est la théorie de l'approximation stochastique qui permet d'aborder de manière adéquate les problèmes de récursivité et d'adaptativité en identification, dans un cadre statistique.

Approximation stochastique

L'usage des algorithmes stochastiques est très répandu, et recouvre des domaines tels que la commande adaptative, les systèmes de transmission, le filtrage adaptatif, certains algorithmes d'apprentissage en reconnaissance des formes, etc. De nombreux exemples se trouvent dans [Sar74,BMP90,LS83].

Le but de ces algorithmes est l'estimation récursive d'un paramètre inconnu et invariant dans le temps (ou lentement variable) traditionnellement noté θ . On suppose que les observations Y_n reçues à chaque instant sont reliées au vrai paramètre θ^* par une relation du type

$$E_\theta[H(\theta, Y_n)] = 0, \quad \text{si } \theta = \theta^*$$

où E_θ désigne l'espérance selon la loi de Y_n , H est une fonction connue, mais la distribution de Y_n est inconnue et peut dépendre de θ (d'où l'indice θ dans E_θ). Dans un grand nombre de situations, H est le gradient d'une fonction à minimiser (erreur quadratique de prédiction, ...). La structure générale de l'algorithme de minimisation sera alors

$$\theta_n = \theta_{n-1} - \gamma_n H(\theta_{n-1}, Y_n)$$

où γ_n est une suite décroissante, typiquement $1/n$ ou une constante, et θ_n est l'estimée de θ^* au temps n .

Par exemple, si $H(\theta, Y) = \theta - Y$, et $\gamma_n = 1/n$, alors θ_n est simplement la moyenne arithmétique des Y_n . Une situation plus compliquée est celle des algorithmes de Robbins-Monro : on cherche à régler le paramètre θ (par exemple le dosage de produits chimiques) de sorte que l'effet mesuré par Y (en l'occurrence la chaleur produite) soit à un niveau moyen α , et la règle du jeu est que Y_n est le résultat d'une expérience faite avec θ_{n-1} ; dans cette situation $H(\theta, Y) = Y - \alpha$. Dans l'exemple du modèle (1), on choisira typiquement d'estimer θ avec

$$Y_n = (y_n, y_{n-1}, u_n, u_{n-1})$$

$$H(\theta, Y_n) = \frac{\partial}{\partial \theta} (y_n - f(\theta, y_{n-1}, u_n, u_{n-1}))^2.$$

L'étude théorique de ces algorithmes est généralement faite dans un cadre Markovien assez large donnant une forme explicite à la dépendance en θ de la loi du processus Y_n [BMP90].

Si l'on s'intéresse aux gains en $1/n$, il est acquis [HH80,NK76,BMP90,KC78,Del96b] que sous

-
- [Sar74] G. N. SARIDIS, « Stochastic approximation methods for identification and control – A survey », *IEEE Transactions on Automatic Control AC-19*, 6, décembre 1974, p. 798–809.
 - [BMP90] A. BENVENISTE, M. MÉTIVIER, P. PRIOURET, *Adaptive Algorithms and Stochastic Approximations, Applications of Mathematics*, 22, Springer-Verlag, New York, 1990.
 - [LS83] L. LJUNG, T. SODERSTRÖM, *Theory and Practice of Recursive Identification*, The MIT Press, Cambridge, 1983.
 - [HH80] P. HALL, C. C. HEYDE, *Martingale Limit Theory and Its Applications*, Academic Press, New York, 1980.
 - [NK76] B. M. NEVELSON, R. Z. KHASHINSKII, *Stochastic Approximation and Recursive Estimation, Translations of Mathematical Monographs*, 47, AMS, Providence, 1976.
 - [KC78] H. KUSHNER, D. CLARK, *Stochastic Approximation Methods for Constrained and Unconstrained Systems, Applied Mathematical Sciences*, 26, Springer-Verlag, New York, 1978.
 - [Del96b] B. DELYON, « General results on the convergence of stochastic algorithms », *IEEE Transactions on Automatic Control AC-41*, 9, septembre 1996, p. 1245–1256.

certaines hypothèses, peu restrictives mais pas toujours faciles à vérifier, θ_n converge presque sûrement vers θ^* , et les variables $\sqrt{n}(\theta_n - \theta^*)$ convergent en loi vers une variable normale de variance V satisfaisant une certaine équation de Lyapunov [Del96a]. On vérifie que V peut être améliorée par l'introduction d'une matrice de gain Γ dans l'algorithme :

$$\theta_n = \theta_{n-1} - \gamma_n \Gamma H(\theta_{n-1}, Y_n)$$

et que le choix optimal du gain permet d'atteindre la borne de Cramér-Rao. Malheureusement, cette matrice optimale est généralement inconnue. Cette difficulté peut être évitée par l'usage de l'algorithme de Polyak-Ruppert [Pol90, DJ95b] :

$$\begin{aligned} \theta_n &= \theta_{n-1} - \gamma_n H(\theta_{n-1}, Y_n) \\ \bar{\theta}_n &= \bar{\theta}_{n-1} + \frac{1}{n}(\theta_{n-1} - \bar{\theta}_{n-1}). \end{aligned}$$

avec un gain γ_n typiquement d'ordre $n^{-2/3}$. On peut prouver l'optimalité de cet algorithme (convergence de $\bar{\theta}_n$ vers θ^* à même vitesse que θ_n dans le cas où Γ est choisi au mieux) dans des circonstances assez générales.

Les algorithmes à gain constant ($\gamma_n = \gamma$) sont utilisés en revanche lorsque le vrai paramètre varie lentement dans le temps (situation de poursuite). Les études se concentrent dans ce cas sur une approche asymptotique où γ et la vitesse de variation de θ^* sont petits. Un premier aspect est la convergence dans la période transitoire ($1 \leq n \leq 1/\gamma$), période pendant laquelle θ_n passe de la valeur initiale θ_0 à un voisinage de θ^* . Cette approche dite de l'équation différentielle moyenne est étudiée de façon approfondie dans [BMP90] et conduit à la conclusion suivante : si θ_n^* varie régulièrement à vitesse v , le gain doit être choisi d'ordre $v^{2/3}$, mais si θ_n^* suit une marche aléatoire, le gain doit être proportionnel à l'amplitude moyenne de $|\theta_{n+1}^* - \theta_n^*|$. Un deuxième angle d'attaque correspond à l'étude de la distribution limite de θ_n lorsque θ_n^* a une distribution donnée et γ est fixé [DJ95a], et conduit au même type de conclusion.

Un problème ouvert est l'estimation directe d'un bon gain sans connaissance a priori sur les variations de θ^* : la véritable adaptativité. Ceci correspond à des études en cours dans le projet, qui ont déjà été amorcées dans un cadre applicatif pour un problème d'analyse d'images météorologiques; il s'est agi d'utiliser une méthode statistique inspirée de la solution d'un problème d'estimation non-paramétrique dans un cadre min-max, voir le rapport 1997 du projet Vista.

Un autre problème en cours de traitement est l'approximation stochastique pour les paramètres de grande dimension. L'idée, pour rendre le problème soluble, est de supposer que le

-
- [Del96a] B. DELYON, *Études d'algorithmes d'estimation adaptative*, Habilitation à diriger des recherches, université de Rennes I, juin 1996.
- [Pol90] B. T. POLYAK, « New stochastic approximation type procedures », *Automatika i Telemekhanika (in Russian)*, juillet 1990, p. 98–107, translated as *Automation & Remote Control*, 51(7).
- [DJ95b] B. DELYON, A. JUDITSKY, « Stochastic approximation with averaging », *Publication Interne n° 952*, IRISA, 1995, <ftp://ftp.irisa.fr/techreports/1995/PI-952.ps.gz>.
- [DJ95a] B. DELYON, A. JUDITSKY, « Asymptotical Study of Parameter Tracking Algorithms », *SIAM Journal on Control and Optimization* 33, 1, janvier 1995, p. 323–345.

vrai paramètre θ^* appartient à la boule unité de ℓ_1 . Cette contrainte réduit considérablement le volume de l'espace de recherche tout en restant réaliste pour les applications. Un avantage supplémentaire est qu'on aboutira à des estimées $\hat{\theta}$ parcimonieuses, au sens où la majorité des coefficients seront quasi-nuls. Dans ces circonstances, même en déterministe, les méthodes de gradient sont totalement inefficaces (puisque le gradient appartient au dual de l'espace d'origine, qui diffère maintenant de ce dernier). Il faut alors utiliser la méthode des algorithmes miroirs décrite dans [JN96].

Estimation non-paramétrique

Sous sa forme la plus traditionnelle, le problème de l'estimation non-paramétrique se pose ainsi : on observe des paires (x_n, y_n) indépendantes où

$$y_n = f(x_n) + e_n.$$

Les e_n sont des variables gaussiennes i.i.d. (indépendantes identiquement distribuées) et f est la fonction inconnue à estimer. L'erreur d'estimation considérée est le risque quadratique

$$\int |\hat{f}(x) - f(x)|^2 p(dx)$$

où $p(dx)$ est la distribution de x_n et \hat{f} est l'estimée de f . L'approche conceptuellement la plus simple consiste à supposer que f appartient à un certain ensemble de fonctions \mathcal{F} qui doit être compact dans l'ensemble des fonctions continues (sinon on ne pourra jamais estimer f en un sens raisonnable), par exemple,

$$\mathcal{F} = \{f : \sup_x |f(x)| + \sup_x |f'(x)| + \sup_x |f''(x)| \leq 1\}$$

et de réaliser le maximum de vraisemblance

$$\hat{f} = \arg \min_{\mathcal{F}} \sum_{n=1}^N (y_n - f(x_n))^2.$$

Cet algorithme est asymptotiquement optimal dans de nombreuses situations (ce n'est cependant pas toujours le cas), et converge, en norme L_2 , à une vitesse qui se rapproche de la vitesse paramétrique $1/\sqrt{N}$ lorsque la classe \mathcal{F} se restreint à des fonctions de plus en plus régulières. Cet algorithme étant irréalisable en raison de sa complexité, des alternatives ont été proposées depuis longtemps [6]. Les méthodes les plus récentes font appel aux ondelettes et donnent lieu à des algorithmes dits adaptatifs, car ils ne requièrent pas la connaissance exacte de \mathcal{F} ; ils sont dûs à D. Donoho, I. Johnstone, G. Kerkycharian et D. Picard [DJ96].

Les problèmes qui nous intéressent sont liés à la situation où l'on observe un système dynamique du type

$$y_n = f(y_{n-1}, u_n) + e_n.$$

-
- [JN96] A. JUDITSKY, A. NEMIROVSKI, « Functional Aggregation for Nonparametric Estimation », *Publication Interne n° 993*, IRISA, 1996, <ftp://ftp.irisa.fr/techreports/1996/PI-993.ps.gz>.
- [DJ96] B. DELYON, A. JUDITSKY, « On minimax wavelet estimators », *Applied Computational Harmonic Analysis* 3, 1996, p. 215-228.

Dans cette situation, la loi de $x_n = (y_{n-1}, u_n)$ dépend elle-même de f , ce qui influe sur l'algorithme; de plus la suite (x_n) n'est plus indépendante, ce qui ralentit l'approximation (en particulier si la variance de e_n est petite!).

3.2 Surveillance et diagnostic par des techniques du traitement statistique du signal

Voir modules 3.1 et 6.1.

Mots clés : détection de panne, identification, approche locale, diagnostic de panne, alarme intelligente.

Glossaire :

Approche locale Technique statistique permettant de comparer l'adéquation de deux modèles différents à un même échantillon de données, lorsque la taille de l'échantillon tend vers l'infini. Pour éviter alors des situations singulières, on renormalise l'écart entre ces deux modèles en le rendant proportionnel à $1/\sqrt{N}$ où N est la longueur de l'échantillon. On obtient ainsi des théorèmes du type théorème-limite central pour la statistique permettant de décider de la comparaison entre ces modèles, ce qui permet de calibrer de manière fondée les divers seuils, en prenant en compte les incertitudes sur le modèle et les mesures.

Alarmes intelligentes Indicateurs de panne, porteurs d'informations relatives au diagnostic, sous la forme des composants le plus probablement responsables de la panne détectée. Ces indicateurs réalisent automatiquement le compromis entre l'amplitude des changements détectés et la précision de l'identification du modèle de référence d'une part, et le niveau de bruit présent sur les mesures d'autre part. Ces indicateurs sont peu coûteux, et peuvent donc être embarqués [GD91,BBGD⁺93].

Résumé : *Nous avons développé une méthode statistique de portée générale permettant de confronter un modèle à des données mesurées sur un procédé, et de détecter une éventuelle inadéquation entre modèle et mesures, même si celle-ci est imperceptible de prime abord. Décider de manière précise d'une telle inadéquation nécessite de comparer l'effet prédit, dans le cas d'un changement du procédé, avec les incertitudes que l'on a sur les mesures. L'approche dite « asymptotique locale » introduite dans les années 70 par Le Cam [Rou72,Le 86], et que nous avons étendue*

-
- [GD91] B. GACH-DEVAUCHELLE, *Diagnostic mécanique des fatigues sur les structures soumises à des vibrations en ambiance de travail*, Thèse, université de Paris IX Dauphine, décembre 1991.
- [BBGD⁺93] M. BASSEVILLE, A. BENVENISTE, B. GACH-DEVAUCHELLE, M. GOURSAT, D. BONNECASE, P. DOREY, M. PREVOSTO, M. OLAGNON, « Damage monitoring in vibration mechanics: issues in diagnostics and predictive maintenance », *Mechanical Systems and Signal Processing* 7, 5, 1993, p. 401–423.
- [Rou72] G. ROUSSAS, *Contiguity of Probability Measures : Some Applications in Statistics*, *Cambridge Tracts in Mathematics*, 63, Cambridge University Press, Cambridge, 1972.
- [Le 86] L. LE CAM, *Asymptotic Methods in Statistical Decision Theory*, *Springer Series in Statistics*, Springer-Verlag, New York, 1986.

et adaptée ^[BMP90,BN93], permet de fonder une telle démarche ^[Bas98].

On se donne une suite d'observations $(Y_n)_{n \geq 0}$ de loi jointe P_θ , où P_θ dépend d'un paramètre inconnu $\theta \in \mathbf{R}^p$. Par ailleurs, on dispose d'une valeur *nominale* θ_0 pour le paramètre θ . Cette valeur nominale θ_0 peut, par exemple, représenter un comportement «type» normalisé pour le système considéré. Elle peut également avoir été obtenue par identification à l'aide de données de référence, provenant, par exemple, de mesures prises sur le système à surveiller en état nominal de fonctionnement.

Les questions que l'on se pose sont alors les suivantes :

1. *L'échantillon $(Y_n)_{n \geq 0}$ admet-il P_{θ_0} comme modèle ?* Il s'agit de savoir si l'échantillon observé est bien en conformité avec le modèle nominal.
2. En cas de réponse négative, *quelles sont les composantes de θ qui ont le plus changé ?* Il s'agit là d'effectuer un diagnostic sur la nature du changement de comportement. Dans le cas où le paramètre θ a une signification physique, on obtient ainsi un diagnostic sur l'origine du changement de comportement.

Supposons que l'on sache trouver une fonction $H(\theta, Y)$, dite *fonction d'estimation*, telle que

$$E_\theta[H(\theta_0, Y_n)] = 0 \quad \text{si et seulement si} \quad \theta = \theta_0 . \quad (2)$$

La condition (2) est par exemple satisfaite si $H(\theta, Y)$ provient d'une méthode d'identification du paramètre θ , voir module 3.1. Répondre à la question 1 revient par conséquent à tester si, pour le nouvel échantillon observé (Y_n) , on a bien $H(\theta_0, Y_n) = 0$ en moyenne. Ceci peut être réalisé de manière précise si l'on connaît la loi, sous P_θ , de la statistique $H(\theta_0, Y_n)$. C'est ce que l'*approche asymptotique locale*, introduite par Le Cam dans les années 70 pour les techniques de maximum de vraisemblance, permet d'obtenir.

L'idée est la suivante : étant donné un échantillon $(Y_n)_{1 \leq n \leq N}$ de longueur N , on cherche à approcher la loi de la statistique

$$U_N(\theta_0) = \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{n=1}^N H(\theta_0, Y_n)$$

dans le cas où le vrai paramètre θ est :

$$\theta = \theta_0 + \frac{\tilde{\theta}}{\sqrt{N}}$$

ce qui signifie que le modèle nominal s'écarte du vrai modèle en $O(1/\sqrt{N})$ — c'est là l'originalité de l'approche locale de Le Cam. Après un développement de Taylor autour de θ , il vient

$$U_N(\theta_0) \approx U_N(\theta) - \frac{1}{N} \left(\sum_1^N \frac{\partial}{\partial \theta} H(\theta, Y_n) \right) \tilde{\theta} \quad (3)$$

-
- [BMP90] A. BENVENISTE, M. MÉTIVIER, P. PRIOURET, *Adaptive Algorithms and Stochastic Approximations, Applications of Mathematics, 22*, Springer-Verlag, New York, 1990.
- [BN93] M. BASSEVILLE, I. NIKIFOROV, *Detection of Abrupt Changes — Theory and Applications, Information and System Sciences Series*, Prentice Hall, Englewood Cliffs, 1993, <http://www.irisa.fr/sigma2/kniga/>.
- [Bas98] M. BASSEVILLE, « On-board component fault detection and isolation using the statistical local approach », *Automatica* 34, 11, novembre 1998, p. 1391–1416.

Par le théorème-limite central sous la loi P_θ , $U_N(\theta)$ est asymptotiquement gaussien centré, de covariance Σ que l'on sait calculer ou estimer. Tandis que, toujours sous P_θ , la loi des grands nombres nous donne la convergence du second terme vers sa moyenne $-E_\theta \left[\frac{\partial}{\partial \theta} H(\theta, Y_n) \right]$. Ceci nous permet de décrire le comportement de la statistique $U_N(\theta_0)$ sous des hypothèses très générales, et de concevoir des tests permettant de décider si le modèle nominal θ_0 est conforme ou non au nouvel enregistrement.

Mais on peut tirer de (3) d'autres enseignements. Le vrai paramètre θ étant toujours inconnu, on souhaite l'identifier en résolvant, avec θ_0 cette fois comme inconnue, l'équation ^[MS88]

$$\hat{\theta}_N = \arg_{\theta_0} \{U_N(\theta_0) = 0\} \quad (4)$$

La valeur ainsi obtenue pour le paramètre θ_0 sera notée $\hat{\theta}_N$ pour indiquer qu'il s'agit d'un estimateur du paramètre θ . Après report de la contrainte $U_N(\theta_0) = 0$ dans (3), il vient

$$\sqrt{N}(\hat{\theta}_N - \theta) \approx -E_\theta \left[\frac{\partial}{\partial \theta} H(\theta, Y_n) \right]^{-1} U_N(\theta)$$

et il apparaît que l'on peut ainsi déduire le théorème-limite central pour l'estimateur (4) du théorème précédent concernant la statistique $U_N(\theta)$. Pour tout ceci, voir en particulier l'article ^[DJB97].

4 Domaines d'applications

Résumé : *Les domaines d'application du projet sont divers, nous citons ici ceux qui ont donné ou donnent lieu à des applications avec partenaire industriel et données réelles à traiter. Ce sont: la mécanique des vibrations, la reconnaissance de la parole, le contrôle d'accès dans les communications mobiles, le diagnostic dans les réseaux de télécommunications, les problèmes d'indexation en multimedia, l'énergie, la géophysique, le traitement d'antenne, l'électronique embarquée pour l'industrie automobile, et la robotique sous-marine. L'augmentation de l'effort dans le domaine des télécommunications est un choix du projet. Nous avons choisi de détailler notre action en mécanique des vibrations, qui constitue clairement notre investissement cumulé majeur. Puis nous décrivons notre activité dans le domaine des télécommunications.*

4.1 Analyse de structures vibrantes en ambiance de travail

Voir modules 3.2 et 6.1.

Mots clés : vibration, mécanique, analyse modale, méthode de sous-espace.

[MS88] D. McLEISH, C. SMALL, *The Theory and Application of Statistical Inference Functions, Lecture Notes in Statistics, 44*, Springer-Verlag, Berlin, 1988.

[DJB97] B. DELYON, A. JUDITSKY, A. BENVENISTE, « On the relationship between identification and local tests », *Publication Interne n° 1104*, IRISA, mai 1997, <ftp://ftp.irisa.fr/techreports/1997/PI-1104.ps.gz>.

Glossaire :

Analyse modale Identification des *modes de vibration*, consistant en 1/ les fréquences de vibration et amortissements associés, et en 2/ la partie observée des vecteurs propres associés.

Méthodes de sous-espace voir module 6.1.

Résumé : *Dans une série d'études entreprises depuis 1980, le projet Sigma2 a développé une technologie originale offrant les services suivants, pour une structure en ambiance de travail :*

- *analyse modale,*
- *corrélation entre mesures et modèle,*
- *détection et diagnostic de fatigues.*

Le fait, pour ces méthodes, d'opérer en ambiance de travail, impose les contraintes suivantes :

- *l'excitation est naturelle, résultant des conditions mêmes de fonctionnement de la structure, elle est souvent non stationnaire,*
- *l'excitation n'est pas mesurée.*

Les applications industrielles de la surveillance vibratoire en fonctionnement sont diversifiées, que ce soit pour des structures mécaniques complexes (plate-formes offshore, ponts, barrages, bâtiments) ou les machines (turbo-alternateurs, systèmes d'engrenage). Des outils de détection et diagnostic de petits changements de caractéristiques vibratoires sont particulièrement utiles pour la mise en place de politiques de maintenance préventive basées sur l'évolution effective de l'état de la machine ou de la structure surveillée, par opposition à une programmation a priori systématique.

Les méthodes classiques d'analyse et de surveillance vibratoires des structures mécaniques et machines tournantes sont essentiellement dédiées au traitement de mesures prises soit sur banc d'essai soit dans des conditions d'excitation ou de vitesse de rotation spécifiques. L'objet du projet Euréka no 1562 Sinopsys (Model based **Structural** monitoring using **in-operation** system identification) coordonné par LMS (Leuven Measurements Systems, Leuven, Belgique) est précisément le développement et l'intégration de logiciels d'analyse et de surveillance vibratoires dédiés au traitement de mesures prises pendant le fonctionnement usuel de la structure ou machine considérée, sans excitation artificielle, ni ralentissement, ni arrêt de machine. Les projets Sigma2 et Meta2 de l'Inria sont conjointement engagés dans Sinopsys.

La principale contribution de l'Inria à Sinopsys consiste en une algorithmique originale de traitement de signaux multi-capteurs (d'accélérométrie par exemple), fournissant des alarmes intelligentes, c'est-à-dire des alarmes donnant des causes profondes des défauts ou fatigues subis par la structure ou la machine. Ces logiciels peuvent être embarqués et fonctionner en-ligne. Parmi les données réelles que l'Inria doit traiter avec les logiciels développés dans Sinopsys, figurent les données des vols d'essai d'Ariane 5.

La première étape du projet Sinopsys s'étant focalisée sur l'analyse modale et l'identification des modes de vibration, nous avons revu et amélioré nos méthodes, en particulier pour ce qui concerne les procédures interactives de sélection et de validation de modes. Nous avons développé une première version d'un module de *validation de modèle*, permettant une validation

croisée du résultat d'une identification sur un jeu de données de validation. L'ensemble de ces fonctionnalités est intégré dans l'outil Cada_X de LMS.

Dans une seconde étape, nous développons un outil de détection de fatigue, en évaluant le degré d'importance de la modification du comportement modal, pour chaque mode. Ceci fonctionne, tant sur données de laboratoire avec excitation mesurée, que sur données en fonctionnement sans mesurer l'excitation.

La dernière étape porte sur le développement d'un outil de diagnostic des fatigues, où l'on cherche à expliquer les fatigues en termes de modification de la masse volumique ou du module d'Young, avec localisation de ces changements sur la structure.

Une telle algorithmique de surveillance et de diagnostic a été généralisée à des modèles plus complexes que ceux liés aux vibrations, et peut être utilisée dans le cadre de la surveillance pour l'aide à la conduite de procédés industriels (turbine à gaz, centrale électrique ou thermique, etc.) ou pour le diagnostic embarqué (pot catalytique, etc.).

4.2 Télécommunications : accès partagé au canal, protection du canal, et diagnostic de pannes en gestion de réseaux

Mots clés : télécommunication, CDMA, turbo-code, gestion de réseau, diagnostic de pannes.

Glossaire :

CDMA Code Division Multiple Access : mode de partage du canal en communications mobiles récemment retenu comme norme pour le futur UMTS (Universal Mobile Telecommunications Systems).

Turbo-codes Codes correcteurs d'erreurs récemment introduits par Berrou, Glavieux *et al.*, alliant deux codes convolutifs via un entrelaceur. Le nom provient de l'algorithme itératif de décodage, manipulant une information «soft», de nature probabiliste.

Le domaine traditionnel du projet dans les télécommunications concerne plus particulièrement les extrémités (ou «boucle locale»). Après une activité maintenant ancienne sur l'égalisation, le projet s'intéresse à l'accès multiple de type (w)CDMA. Dans cette technique, le recours à un code raccourci pour le partage rend beaucoup plus difficile qu'en CDMA traditionnel la séparation des utilisateurs en réception. Nous regardons la conception d'un tel récepteur sous l'angle de la séparation de sources en aveugle.

Par ailleurs, nous nous intéressons également aux turbo-codes et à leurs extensions, en raison du lien récemment établi entre ces codes et les réseaux bayésiens, sujet traité dans le projet depuis plusieurs années. Les techniques de décodage «soft» peuvent en effet se lire comme un problème d'estimation de variables cachées dans un réseau bayésien (ou un champ de Markov). Ce problème classique en traitement du signal et des images a été abordé sous de nombreux angles dans le projet, ce qui suggère de nouvelles pistes de conception de codes et d'algorithmes de décodage.

Toutefois, notre investissement principal, à l'heure actuelle, concerne le *diagnostic des pannes* en gestion de réseaux. Nous cherchons, à partir d'une modélisation du réseau à un niveau convenable d'abstraction, à engendrer automatiquement les règles permettant le diagnostic. Cette technique permet d'envisager une réadaptation plus aisée des logiciels de diagnos-

tic, lorsque le réseau évolue. L'originalité de cette approche est que nous cherchons d'emblée une modélisation modulaire du réseau, dans le but de distribuer l'algorithmique de diagnostic. Ce travail se fait en collaboration avec le projet Pampa, et fait l'objet du projet exploratoire RNRT Magda, voir module 7.1.

5 Logiciels

5.1 Nonlinear Modelling Matlab Toolbox

Participants : Albert Benveniste, Bernard Delyon, Qinghua Zhang [correspondant].

Mots clés : identification, identification boîte-noire, non-linéaire, non-paramétrique, réseau de neurones, réseau d'ondelettes, Matlab toolbox.

Résumé : *En coopération avec Lennart Ljung, de l'université de Linköping en Suède, et Anatoli Iouditski, du projet IS-2 de l'Inria Rhône-Alpes, nous préparons une boîte à outils Matlab. Cette boîte à outils est conçue comme une extension de la SITB (System Identification toolbox) de Lennart Ljung pour la modélisation de systèmes dynamiques non linéaires. En plus des techniques classiques pour l'estimation de modèles paramétriques, les algorithmes sont basés sur l'estimation non-paramétrique, les réseaux d'ondelettes et les réseaux de neurones. Les modèles proposés sont, pour l'essentiel, de type régression ou auto-régressif non-linéaire (Narx), avec quelques extensions spécifiques pour lesquelles on dispose de bons algorithmes.*

Sur la base d'un travail conduit en coopération avec l'université de Linköping [6, 7], nous avons décidé de réaliser une boîte à outils Matlab pour la modélisation de systèmes dynamiques non linéaires, prolongeant la SITB (System Identification toolbox) de Lennart Ljung. L'interface de dialogue ainsi que l'interface graphique seront très largement communes avec la SITB.

En ce qui concerne les modèles offerts, ce sont d'une part, des modèles paramétriques sous forme d'état, d'autre part, des modèles boîte-noire de type 1/ régression non-linéaire, 2/ Narx (Non-linéaire, AutoRégressif avec entrée eXogène), 3/ Wiener (Arma linéaire précédé d'une non-linéarité statique), et 4/ Hammerstein (Arma linéaire suivi d'une non-linéarité statique). Pour les modèles boîte-noire, l'originalité consiste en l'utilisation intensive d'algorithmes non itératifs, ne faisant pas appel à la rétropropagation ni à des méthodes de gradient. On gagne ainsi en vitesse d'identification de manière spectaculaire, et l'on évite les écueils liés à l'accrochage d'une méthode d'optimisation (comme la rétropropagation) sur un optimum local. Pour ces méthodes, voir les articles [6, 7]. Ces méthodes seront en outre complétées par des techniques de rétropropagation, étendues à certaines catégories de systèmes Narmax (Armax non-linéaires). Outre les services d'identification proprement dite, il sera également offert des moyens de valider une modélisation conduite avec une classe restreinte de modèles (par exemple, on pourra tester si une modélisation linéaire est ou non suffisante).

La programmation de la boîte à outils exploite largement les fonctionnalités de Matlab en matière de programmation objet.

6 Résultats nouveaux

6.1 Surveillance et diagnostic

Voir modules 3.2, 4.1 et 6.2.

Mots clés : supervision, mécanique, diagnostic, maintenance conditionnelle, détection de panne.

Glossaire :

Maintenance conditionnelle Type de maintenance où la décision d'intervenir se fait sur observation continue du procédé, sur détection et diagnostic de dysfonctionnements. Permet une diminution des coûts de maintenance.

Résumé : *Les acquis du projet dans ce domaine consistent en une démarche générale de surveillance et de diagnostic d'installations industrielles pour la maintenance conditionnelle, validée par des exemples d'application réels : surveillance de structures mécaniques soumises à vibrations avec l'Ifremer puis EDF, voir module 4.1, surveillance des chambres de combustion de turbines à gaz avec EGT-Alstom, surveillance du système de dépollution d'une automobile avec Renault, en coopération avec le projet Sosso, diagnostic des défauts dans le système de combustion et de génération de vapeur d'une centrale thermique avec EDF/DER.*

Les travaux de recherche conduits en 1999 concernent à la fois des aspects méthodologiques, le traitement de nouvelles applications, voir module 7.2, et des aspects d'implantation et de transfert. Relève en particulier de ce dernier aspect le projet Eureka SINOPSYS qui vise, pour ce qui nous concerne, à opérer un transfert industriel de nos méthodes d'identification et de surveillance de systèmes soumis à vibrations en opération. Pour plus de détails, voir module 4.1.

6.1.1 Surveillance de systèmes non-linéaires dynamiques

Participants : Qinghua Zhang, Michèle Basseville, Aiping Xu.

Le problème est de surveiller et de diagnostiquer les variations du vecteur de paramètres θ dans un système obéissant à un modèle de la forme :

$$\begin{cases} \dot{x} &= f(\theta, x, u) \\ y &= g(\theta, x, u) + \text{bruit} \end{cases}$$

Nous avons déjà étudié deux méthodes pour résoudre ce problème, l'une basée sur un observateur et sa dérivée par rapport aux paramètres θ , l'autre sur l'élimination des variables d'état [53]. La méthode développée cette année consiste à générer des résidus à partir d'un observateur et un ensemble d'observateurs adaptatifs. Ces résidus sont évalués par une méthode statistique robuste au bruit de mesure. Les observateurs adaptatifs estiment les paramètres θ en plus des variables d'état x . La conception d'observateurs adaptatifs pour des systèmes non linéaires est en général un problème difficile. Pour réduire cette difficulté, on se restreint à des observateurs adaptatifs qui estiment chacun un seul paramètre en plus des variables

d'état x . À cause de cette restriction, le diagnostic repose sur l'hypothèse mono-panne (un seul paramètre est susceptible de changer). Pour plus de détails, voir [58] où la méthode est illustrée par un exemple de satellite. Avec le démarrage de la thèse de Aiping Xu, nous continuons à étudier d'autres méthodes pour la surveillance de systèmes non-linéaires dynamiques, en nous appuyant sur des progrès récents dans les domaines des observateurs non-linéaires et de l'estimation statistique.

6.1.2 Méthodes de sous-espace, application à la surveillance de structures soumises à vibrations en opération

Participants : Michèle Basseville, Albert Benveniste, Bernard Delyon, Laurent Mevel.

Ce travail est conduit en coopération avec Maurice Goursat, du projet Meta2 de l'Inria Rocquencourt, dans le cadre du projet Eureka Sinopsys coordonné par la société LMS, voir modules 4.1 et 7.4.

Le problème traité est celui de la surveillance de la structure propre (valeurs propres de F et partie observée des vecteurs propres associés) d'un système de la forme :

$$\begin{cases} X_{k+1} &= F X_k + V_k \\ Y_k &= H X_k + W_k \end{cases}$$

La dimension de X_k est de l'ordre de quelques dizaines et celle de Y_k de l'ordre de quelques unités. Notons R_k la suite des matrices de covariance de Y_k , et notons \mathcal{H} la matrice de Hankel formée à l'aide de la suite R_1, R_2, R_3, \dots . Par ailleurs, soit \mathcal{O} la matrice d'observabilité du couple (H, F) . Les matrices \mathcal{H} et \mathcal{O} ont même noyau à gauche (complémentaire orthogonal de l'image). Cette propriété peut être utilisée pour estimer \mathcal{O} à partir de la donnée de la matrice de Hankel empirique (où les \hat{R}_k sont des estimées empiriques des covariances) : c'est le principe des méthodes d'identification de sous-espace pour notre problème. Mais elle peut aussi être utilisée à l'envers : on se donne un \mathcal{O} nominal (c'est équivalent en gros à la donnée de la structure propre du système considéré), dont on calcule le noyau à gauche représenté par une matrice S . Étant donné de nouvelles mesures, et donc une nouvelle matrice de Hankel empirique, le problème est alors de tester si, oui ou non, l'on a $S^T \hat{\mathcal{H}} = 0$. Nous avons développé une méthode locale pour ce problème, voir module 3.2, qui repose sur un théorème-limite central [14]. Les algorithmes correspondants possèdent une propriété d'invariance intéressante [15].

Concernant cette méthode, ainsi que la méthode d'identification par sous-espace qui lui est associée, les résultats nouveaux suivants ont été obtenus au cours de l'année.

Expérimentations. Diverses expérimentations sur structures simulées ou réelles ont été conduites, à LMS, par Laurent Mevel (Inria, mis à disposition de LMS) et Luc Hermans (LMS).

- Une structure de laboratoire reproduisant un châssis de voiture a été testée, avec de légères modifications de répartition de masses [42, 24].
- Des données réelles d'une voiture présentant des problèmes de transmission ont été testées. Il s'agissait de jeu de données fournies à LMS par un constructeur automobile lors d'une étude antérieure, et qui ont été réutilisées pour tester la méthode de surveillance [37, 24].

- Des données expérimentales ont été collectées sur un pont désaffecté en Suisse, situé au dessus d'une autoroute, au cours d'un processus de dégradation volontaire de la structure [36, 43].

Les résultats ont été satisfaisants sur les deux premiers exemples. Ils sont non concluants sur le dernier : la difficulté vient de ce que, d'une part les données semblent de mauvaise qualité, et d'autre part les facteurs environnementaux (température, humidité, etc.) influent également sur le comportement vibratoire de la structure. Ce dernier point va faire l'objet de travaux de recherche, portant d'une part sur une modélisation simplifiée des facteurs environnementaux et, d'autre part, sur des techniques statistiques permettant leur réjection.

Les expérimentations faites précédemment par Maher Abdelghani dans les domaines aéronautique et aérospatial ont été publiées [13, 25, 26].

Identification par combinaison de mesures prises sur des jeux de capteurs différents. La situation suivante se rencontre fréquemment en analyse modale : on dispose d'un nombre limité de voies de mesure, mais un grand nombre de points de mesure possibles sont disponibles. Comment exploiter ces possibilités? La technique consiste à garder fixe un ou plusieurs capteurs, qui servent ainsi de référence, puis à déplacer les autres sur tous les points de mesure possibles. Le problème est alors de recomposer les mesures ainsi obtenues, de façon à obtenir un modèle unique, comme si l'on avait disposé d'un capteur à chaque point de mesure possible.

Nous avons donc étudié comment faire ceci, dans le cas de l'identification en fonctionnement, où une difficulté supplémentaire apparaît : le caractère non stationnaire de l'excitation, laquelle varie donc d'un enregistrement à l'autre. Il n'est plus possible, alors, de fusionner simplement les matrices de covariances mesurées puis de les fournir à une méthode de sous-espace globale, la non-stationnarité de l'excitation perturbant le résultat. Nous avons proposé une renormalisation non triviale du facteur droit de la factorisation de la matrice de Hankel, qui réalise la normalisation nécessaire. On peut donc, maintenant, proposer une version dite «polyréférence», pour la méthode d'identification par sous-espace en ambiance de travail. Cette année, un exposé détaillé de la méthode a été rédigé, et accepté pour présentation à Imac'2000.

Test local pour la surveillance par analyse dans le domaine fréquentiel. Ce travail a été conduit à la demande de la société LMS, qui est intéressée, pour le contrôle de qualité, à développer un module de test local associé à l'analyse modale classique entrée/sortie par analyse dans le domaine fréquentiel. Nous appuyant sur les théorèmes du type théorème-limite central disponibles pour les estimateurs de type «périodogramme», nous avons conçu un tel test. La spécification détaillée de l'algorithme a été transmise à LMS, et un exposé détaillé de la méthode a été rédigé.

6.1.3 Détectabilité de pannes

Participante : Michèle Basseville.

Tout comme dans [2], nous distinguons deux types de définitions, soit intrinsèques au système surveillé et aux pannes qui l'affectent, soit relatives à des algorithmes de détection et

de diagnostic, et en particulier au vecteur de résidus sous-jacent.

Pour des pannes additives sur des systèmes linéaires, des définitions possibles exploitent le caractère diagonal de la matrice d'incidence de la panne (sur le système ou sur le résidu), l'inversibilité de la fonction de transfert de la panne (vers le système ou vers le résidu), la structure des différents sous-espaces (dans lesquels vivent les observations ou les résidus) lorsque le système est soumis aux différentes pannes, l'information de Fisher au sujet de la panne (contenue dans les observations ou dans le résidu) et le caractère diagonal de cette matrice, la distance de Kullback entre le système sain et le système en panne. Des équivalences existent entre plusieurs de ces définitions [2].

Pour des pannes affectant la dynamique de systèmes, linéaires ou non, on peut, pour les algorithmes conçus au moyen de notre approche statistique locale, définir une matrice d'incidence des pannes sur les résidus, l'information de Fisher que les résidus contiennent au sujet des pannes, et la distance de Kullback entre les résidus correspondant au système sain et au système en panne [56].

L'examen des distances de Kullback calculées pour différentes pannes, permet, pour une méthode (un résidu) donnée, de prévoir les pannes les mieux détectables. L'examen de la distance à la diagonale des matrices d'information de Fisher correspondant à différents résidus permet de prévoir quel résidu permet la meilleure isolation des différentes pannes.

C'est ainsi que, sur un petit exemple non-linéaire de circuit électrique, traité soit par élimination soit par estimation de l'état inconnu [53], nous pouvons, pour chacune des deux approches, quantifier la détectabilité des deux pannes considérées, et affirmer que l'élimination de l'état rend plus difficile l'isolation des deux pannes que l'estimation [27], ce que confirment les résultats expérimentaux.

6.2 Systèmes hybrides

Voir modules 7.1 et 6.1.

Mots clés : système hybride, HMM, réseau de Petri.

Glossaire :

Système hybride Désigne génériquement des systèmes combinant de manière intime des aspects traités habituellement de manière disjointe. Par exemple : état continu/état discret, temps continu (ou échantillonné)/événements, équations ou contraintes/variables aléatoires.

HMM Hidden Markov Models (Modèles de Markov Cachés), technique consistant à inférer, à partir d'observations «bruitées», l'état interne caché d'un automate stochastique (ou chaîne de Markov). Technique très utilisée en reconnaissance de la parole, et plus récemment dans le diagnostic de systèmes dynamiques discrets ou hybrides. Nous étendons cette technique aux réseaux de Petri.

Résumé : *Ce thème d'étude est en grande partie mené conjointement avec le projet Pampa (Claude Jard). En vue de l'application au diagnostic des réseaux de télécommunications, nous avons entrepris d'étendre les techniques dites de HMM aux systèmes distribués, modélisés à l'aide de réseaux de Petri (RdP) sauf selon une interprétation adaptée aux systèmes distribués, c'est-à-dire fondée sur un modèle du temps du type ordre partiel.*

Pour réaliser ceci, il nous a fallu 1/ développer une technique d'observateur d'état fondée sur le dépliage de RdP, 2/ créer une nouvelle notion de RdP stochastique adaptée à la sémantique en ordres partiels et aux techniques de dépliage, 3/ étendre l'algorithme de Viterbi calculant la trajectoire d'état de vraisemblance maximale pour un HMM aux RdP avec interprétation en ordres partiels.

Nous avons aussi étudié l'utilisation de cette démarche pour le diagnostic de procédés industriels modélisables par des systèmes hybrides continus/discrets.

6.2.1 Diagnostic dans les systèmes distribués

Participants : Albert Benveniste, Éric Fabre, Laurie Ricker, Mark Smith.

De nombreuses notions de RdP stochastiques ont été proposées. Si l'on excepte le cas des RdP «à choix libre», aucune notion de RdP stochastique ne fournit une coïncidence exacte entre *concurrence* et *indépendance stochastique* pour un ensemble de transitions. On souhaiterait en effet que deux transitions concurrentes (qui ne sont pas reliées à une place commune), lorsque leur franchissement est probabilisé, se comportent comme des variables aléatoires indépendantes.

On peut montrer que cette exigence est contradictoire avec le fait que le RdP stochastique soit une chaîne de Markov, propriété satisfaite par les notions habituelles de RdP stochastique. En revanche, le bon cadre est celui des «champs Markoviens avec contraintes», qui correspond au modèle dit CSS, développé par A. Benveniste, E. Fabre et B.C. Lévy en 1992-1994 [3]. L'idée de ce modèle est simple: 1/ pour chaque place sujette à conflit (amont et/ou aval), le choix est probabilisé isolément, 2/ on considère l'ensemble de ces places, muni de la loi produit (elles sont alors indépendantes), 3/ on y adjoint les places non sujettes à conflit, 4/ prenant en compte les règles de tir des RdP, on ne conserve que les séquences légales et la loi de probabilité qui en résulte est la loi produit précédemment introduite, *conditionnellement à l'ensemble des séquences légales*. On montre alors qu'on a bien parfaite adéquation entre concurrence et indépendance stochastique pour un ensemble de transitions.

On dispose donc d'une notion de RdP stochastique (RdPS) pour laquelle nous voulons généraliser les techniques HMM. Nous avons montré qu'il suffit de considérer des *pièces* constituées d'une transition et des places qui lui sont reliées en amont ou en aval, et d'associer à chaque pièce prise isolément une *vraisemblance* issue de notre modèle de RdPS, vraisemblance conditionnée par les observations. Le décodage au maximum de vraisemblance revient alors à construire, à la manière d'une programmation dynamique, le puzzle des pièces contribuant aux exécutions de vraisemblance maximale, voir [1].

En 1999, l'effort a porté sur la généralisation de cette approche, pour s'affranchir des réseaux de Petri et offrir un cadre de modélisation plus souple, sous forme d'automates modulaires génériques, facilement instanciables et composables. La sémantique d'ordre partiel des événements dans une histoire, la probabilisation partielle (en particulier l'équivalence concurrence/indépendance) et la notion de pièce sont conservées. Les efforts portent maintenant sur la distribution effective de l'algorithmique de diagnostic, c'est-à-dire la reconstruction d'une histoire globale du système surveillé à partir d'observations locales portant sur une partie du système. Le principe consiste à calculer une histoire locale pour chaque sous-système, et à

échanger le minimum d'information pour assurer la compatibilité de ces histoires locales, les communications se faisant sur un mode asynchrone. Ces travaux sont actuellement orientés vers le prototypage d'un superviseur distribué pour une maquette de réseau SDH (voir le projet Magda, module 7.1).

6.2.2 Diagnostic de systèmes hybrides continu/discret

Participants : Michèle Basseville, Albert Benveniste, Laurent Tromp.

Il s'agit de concevoir une algorithmique de type Viterbi pour résoudre le problème du diagnostic de pannes, posé comme la recherche du chemin le plus probable dans un graphe de défaillances, pour un système composite gouverné par un automate de contrôle-commande, et pour lequel on dispose d'indicateurs de pannes sur les divers composants continus, voir module 6.1.

On a d'abord considéré un seul état de l'automate de contrôle-commande, et adapté l'approche HMM (Hidden Markov Model) à un graphe provenant d'une analyse de fiabilité, et sur lequel les observations sont les indicateurs de pannes sur les composants continus. Ce travail s'est poursuivi par la formalisation du problème de diagnostic, et de l'algorithmique associée, dans un cadre hybride prenant en compte l'ensemble des états de l'automate de contrôle-commande, en s'appuyant sur la modélisation de systèmes hybrides stochastiques soumis à des contraintes développée dans le projet [52].

6.3 Codes correcteurs et modèles graphiques

Participants : Éric Fabre, Arnaud Guyader.

Il a récemment été établi par plusieurs auteurs (Mac Kay, McEliece, etc.) que les algorithmes itératifs de décodage «soft» pour les turbo-codes peuvent se lire comme des algorithmes de propagation de croyance dans un réseau bayésien décrivant les interactions entre les variables aléatoires du code (les bits). En ce sens, le décodage «soft» se ramène à un problème d'estimation de variables cachées dans un réseau bayésien, les autres variables de ce champ étant parfaitement observées. Posé en ces termes, le problème de décodage se rapproche de sujets très classiques en traitement du signal et des images, et l'algorithme de propagation de croyance peut se lire comme une généralisation d'un lisseur de Kalman.

Pour les codes correcteurs, le réseau bayésien (ou champ de Markov) décrivant les interactions entre variables peut admettre une structure simple. C'est le cas des codes convolutifs, qui ont une structure de chaîne de Markov. On sait que l'algorithme de propagation de croyance converge alors en temps fini vers la solution optimale, et permet donc un décodage au maximum de vraisemblance *exact*. Dans le cas des turbo-codes, entrelaçant deux codes convolutifs, le graphe sous-jacent est beaucoup plus compliqué. En particulier, il n'a pas de structure d'*arbre*, et la propagation de croyance devient donc une *méthode approchée* de décodage. On peut démontrer que cette méthode est d'autant meilleure que le graphe compte peu de cycles, et que leur longueur est grande.

Ces constatations ont ramené l'attention de la communauté de codage vers la construction de codes directement à partir d'une représentation graphique, et notamment les codes de

Gallager, dits «sparse parity checks codes», se sont révélés aussi performants que les turbo-codes. Leur inconvénient reste de n’offrir ces performances que pour des longueurs de bloc importantes.

Nos travaux en ce domaine portent sur deux points. Le premier concerne la construction de codes correcteurs à partir de leur représentation sous forme de champ de Markov. On cherche en particulier à caractériser la portée des interactions entre variables, afin de déterminer le degré de protection de chaque variable, ainsi que l’ensemble des mesures nécessaires à son estimation. On s’intéresse ensuite à la conception d’algorithmes approchés de décodage exploitant plus précisément la structure du code. Ces algorithmes étendent et combinent des méthodes d’estimation classiques pour les réseaux bayésiens et le traitement d’images, et permettent d’étendre la portée de la simple propagation de croyance. En particulier, ils permettent de s’affranchir des difficultés liées à la présence de cycles courts. Des expérimentations sont menées actuellement sur des codes combinant les aspects algébriques et graphiques : ils sont conçus comme des codes algébriques courts mis en interaction via une structure graphique.

6.4 Détection et estimation

6.4.1 Estimation spectrale

Participants : Jean-Jacques Fuchs, Nicolas Moal, Benjamin Torno.

Le problème classique de traitement du signal de la détection et de l’estimation de sinusoïdes dans du bruit additif est abordée de façon originale. Comme l’estimation des paramètres et le choix du nombre de sinusoïdes sont des problèmes difficiles à résoudre dans la formulation habituelle, on choisit de linéariser le problème de l’identification des paramètres en discrétisant l’intervalle des fréquences avec une grille régulière dont le pas est adapté au scénario. On aboutit alors à un problème d’estimation linéaire sous-déterminé et sur-paramétré. On le résout en ajoutant au critère des moindres carrés mesurant la fidélité du modèle aux données un terme de régularisation faisant intervenir la norme ℓ_1 de la solution. C’est ce second terme du critère qui va assurer la parcimonie. La pondération à appliquer à ce terme et le pas de discrétisation de la fréquence sont les deux paramètres à régler. Ces travaux qui correspondent à l’application à ce problème précis d’un critère développé dans le projet depuis plusieurs années, ont fait l’objet du travail de thèse de Nicolas Moal [11, 44]. Ils ont permis de mettre en évidence des propriétés intéressantes de cette approche.

6.4.2 Sélection de variables et régression robuste

Participants : Jean-Jacques Fuchs, Benjamin Torno.

L’estimation robuste permet de détecter la présence de mesures aberrantes et de neutraliser ou de limiter leurs effets. Dans le cas le plus simple de la régression linéaire $Y = AX + b$, il s’agit d’obtenir une estimée de X connaissant A , les observations Y et en supposant que dans le bruit b quelques composantes puissent être anormalement grandes. En introduisant dans ce modèle, de nouvelles variables U une par observation, destinées à localiser et modéliser les données aberrantes :

$$Y = AX + U + b$$

le système devient sur-déterminé et il faut utiliser un critère composite pour obtenir une solution parcimonieuse. On vérifie que la solution de :

$$\min_{X,U} \frac{1}{2} \|Y - AX - U\|_2^2 + h \|U\|_1$$

conduit à une estimée de X identique à celle donnée par le M -estimateur de Huber [32]. On peut par la même approche retrouver un critère équivalent à la fonction de Vapnik qui ne pénalise linéairement que les résidus dépassant un seuil.

Pour réaliser simultanément une sélection parmi les régresseurs (les colonnes de A) et rejeter les outliers on peut modifier le critère ci-dessus :

$$\min_{X,U} \frac{1}{2} \|Y - AX - U\|_2^2 + h_1 \|X\|_1 + h_2 \|U\|_1$$

et attribuer des valeurs différentes aux coefficients h_i ou de façon équivalente jouer sur les normes euclidiennes des colonnes de A . Nous avons étudié le comportement de ce critère et son application à la réjection de fouillis dans les radars à impulsions est très prometteuse [30]. Une étude est démarrée dans ce domaine où les échos de fouillis sont modélisés comme les données aberrantes et la sélection de variables correspond à la détection d'une cible dans un ensemble de cases distance-vitesse. Le problème nous a été posé par Thomson CSF/Detexis, et fait l'objet de la thèse de Benjamin Torno.

6.5 Modèles de Markov cachés généraux

Participants : Samy Abbes, Frédéric Cérou, François Le Gland, Laurent Mevel, Nadia Oudjane.

Les résultats obtenus dans la thèse de Laurent Mevel ont été étendus dans plusieurs directions.

- On a montré la consistance presque sûre des estimateurs du minimum de contraste classiques (maximum de vraisemblance, moindres carrés conditionnels, etc.) pour les HMM quand le nombre d'observations tend vers l'infini. On s'est également intéressé au comportement asymptotique de l'estimateur bayésien. Ces deux problèmes ont été étudiés en collaboration avec Lorenzo Finesso (ADSEB/CNR).
- On s'est intéressé au cas où la chaîne de Markov cachée prend ses valeurs dans une partie compacte d'un espace euclidien, et les observations sont conditionnellement gaussiennes. On a montré l'oubli exponentiel de la condition initiale pour le filtre de prédiction, l'ergodicité géométrique pour le triplet (chaîne de Markov, observations, filtre de prédiction), et la consistance des estimateurs du minimum de contraste classiques quand le nombre d'observations tend vers l'infini. La normalité asymptotique de ces estimateurs est à l'étude. La principale innovation est d'utiliser directement le coefficient d'ergodicité τ_1 (associé à la distance en variation totale), plutôt que le coefficient de Birkhoff (associé à la distance projective de Hilbert). Il s'agit d'une collaboration avec László Gerencsér (MTA/SZTAKI) et György Michaletzky (Eötvös Loránd Technical University).

L'extension à un espace d'état continu pose immédiatement le problème de calculer le filtre de prédiction. Les méthodes particulières stochastiques permettent d'approcher la distribution

de probabilité conditionnelle de l'état sachant les observations, au moyen de la distribution empirique d'un système de particules, qui se déplacent selon des réalisations indépendantes de l'équation d'état, et qui sont redistribuées ou se multiplient, en fonction de leur cohérence (quantifiée par la fonction de vraisemblance) avec les observations. Comme toute méthode de type Monte Carlo, ces méthodes sont en principe très attractives, puisqu'elles convergent de façon indépendante de la dimension, pourvu seulement que le nombre de particules converge vers l'infini. En pratique, c'est-à-dire pour un nombre fini de particules, les performances et la simplicité de mise en œuvre sont en général très convaincantes, mais les performances peuvent se dégrader sérieusement lorsque le bruit d'état et/ou le bruit d'observation est faible. Des modifications algorithmiques du type régularisation par noyaux, ainsi qu'une méthode originale de correction progressive, ont été proposées pour remédier à ces problèmes. Ces nouveaux algorithmes ont été analysés et appliqués avec succès dans différents problèmes de pistage [47, 48, 49]. Cette partie fait l'objet du travail de thèse de Nadia Oudjane, préparée à l'Onera, en collaboration avec Christian Musso.

En s'appuyant sur les résultats obtenus par Laurent Mevel dans sa thèse pour l'identification des HMM, on s'intéressera à l'identification des lois de probabilités introduites dans le modèle de Rd PS utilisé pour le diagnostic dans les systèmes distribués, voir module 6.2. Ce travail fera l'objet de la thèse de Samy Abbes, qui débute cette année.

6.6 Imagerie à travers la surface de l'océan

Participant : Frédéric Céro.

Ce travail se fait en étroite collaboration avec René Carmona, de l'université de Princeton.

La motivation de cette activité est la détection de mines sous-marines en eau peu profonde. L'appareillage utilisé (Lidar), habituellement fixé sur le côté d'un hélicoptère, envoie une impulsion Laser, et un détecteur dont le temps d'ouverture est réglé convenablement, récupère la lumière réfléchiée par une certaine bande de profondeur, par exemple entre un et quatre mètres sous la surface. On voudrait, au vu des images fournies par le récepteur, détecter la présence de mines.

Une première phase a consisté à trouver une bonne modélisation du problème, et a permis le développement d'un programme de simulation numérique intégrant la génération de la surface de l'eau, et son évolution en temps, ainsi que les divers effets optiques intervenant dans la propagation de la lumière dans l'eau de mer, pour donner des images tout à fait réalistes.

Ce travail va maintenant se poursuivre en mettant en évidence le rôle et l'importance des différents paramètres du modèle à l'aide du programme de simulation, puis nous tenterons de dégager les bonnes statistiques permettant de répondre à la question de la détection.

6.7 Traitement de la parole et du langage

Voir modules 7.5, 7.6, 7.7, et 8.3.

Mots clés : traitement de la parole, vérification du locuteur, indexation sonore, analyse de données textuelles.

Résumé : *Les signaux de communication linguistique (parlée et écrite) constituent un domaine d'application de nombreuses techniques de traitement et de modélisation du signal. Dans ce contexte, nous nous intéressons à plusieurs aspects liés au contenu linguistique (analyse de données textuelles, reconnaissance de la parole) et para-linguistique (indexation sonore, caractérisation et vérification du locuteur) de ces signaux.*

Les techniques utilisées reposent essentiellement sur des approches statistiques (mélanges de gaussiennes, modèles HMM), des algorithmes d'alignement dynamique (Viterbi, Smith et Waterman) et des méthodes statistiques de détection de rupture (un des thèmes privilégiés du projet Sigma2). Ces différentes techniques sont adaptées aux spécificités du problème traité, notamment les faibles volumes d'apprentissage ou le besoin de traitements en ligne (méthodes adaptatives).

Plusieurs projets, nationaux et européens, apportent des débouchés à ces travaux, notamment l'intégration de nos algorithmes à des prototypes (projets Agir, Divan et Picasso). Nous participons également à des consortiums de laboratoires qui mettent leurs efforts en commun pour participer à des campagnes d'évaluation nationale et internationale (consortium Elisa et action de recherche coopérative Sirocco).

6.7.1 Indexation sonore

Participants : Laurent Benaroya, Frédéric Bimbot, Bernard Delyon, Ivan Magrin-Chagnolleau, Mouhamadou Seck, Didier Zugaï.

L'accroissement permanent de la masse de documents sonores (enregistrements radiophoniques, bandes sonores d'enregistrements vidéo, etc.) rend indispensable le développement d'outils de repérage et de navigation dans ce type de données. L'indexation sonore a pour but de représenter de façon plus structurée le matériau audio afin d'en faciliter l'accès par le contenu ou selon des critères de similarité.

Un premier type de travaux porte sur la détection de segments sonores homogènes (détection de changement de morceau de musique, suivi de locuteur, etc.) et sur la classification de ces segments (en musique et parole, par exemple). Ces travaux reposent sur la combinaison de techniques de détection de ruptures et de méthodes de classification statistique [50, 51], et font l'objet de la thèse de Mouhamadou Seck. Ils font l'objet d'une collaboration étroite avec le projet Vista, dans le contexte de projets nationaux et européens, Divan et Agir.

Des travaux plus amonts portent sur le problème de l'extraction d'atomes sonores et de sons-clés dans des enregistrements audio. Outre des applications en compression du son, on étudie la possibilité de réaliser automatiquement des résumés sonores, pour accéder rapidement au contenu d'un enregistrement, tout en préservant des éléments essentiels de sa structure. Ce travail débute dans le cadre de la thèse de Laurent Benaroya.

6.7.2 Vérification du locuteur

Participants : Frédéric Bimbot, Raphaël Blouet, Bruno Jacob, Ivan Magrin-Chagnolleau, Mouhamadou Seck.

La vérification du locuteur peut être comprise comme un problème de détection. Il s'agit en effet de décider, à partir d'un échantillon sonore, si celui-ci a été prononcé ou non par un locuteur particulier. L'état-de-l'art dans le domaine repose sur l'utilisation de modèles de Markov cachés (HMM) associés à un test de rapport de vraisemblance. Néanmoins, la robustesse des HMM, des algorithmes d'apprentissage et des stratégies de décision est souvent imparfaite, compte tenu du faible volume de données d'entraînement en regard des nombreuses sources de variabilité (dépendance au texte prononcé, variations du canal de transmission, fluctuations de la voix au cours du temps, etc.).

Une partie des travaux en cours porte sur les méthodes d'apprentissage en présence de faibles volumes de données et sur la vérification du locuteur à partir d'un mot de passe choisi par l'utilisateur (projet PICASSO, voir module 7.7).

On s'intéresse également à la vérification du locuteur indépendamment du texte, qu'elle s'effectue à travers le réseau téléphonique (consortium Elisa pour les évaluations Nist) ou directement sur le terminal (convention de recherche avec Bull, voir module 7.8).

6.7.3 Reconnaissance de la parole

Participants : Frédéric Bimbot, Bernard Delyon, Bruno Jacob.

Des comparaisons entre une approche segmentale et une approche centiseconde, pour la reconnaissance de mots isolés en milieu bruité, ont été faites sur deux bases, l'une monolocuteur, l'autre multilocuteur, avec et sans débruitage. Un algorithme d'inférence automatique a été utilisé. L'application est la mise en œuvre d'un répertoire vocal pour la numérotation main-libre en voiture. L'étude sur la reconnaissance de phonèmes a été poursuivie, avec la construction de modèles hors contexte; l'inférence a été également utilisée. Des informations obtenues par la segmentation automatique de l'Irisa ont été introduites pour contraindre les modèles au moment de l'inférence (estimation du nombre d'états utiles), ce qui améliore les résultats, surtout en multilocuteur.

Des travaux sont également en cours pour mettre en œuvre des techniques de décodage rapide de séquences d'états (*Beam-Search*) pour la reconnaissance de parole par HMM. Ces résultats pourront être utilisés en dictée vocale (projet Sirocco), et en indexation par le contenu linguistique.

6.7.4 Analyse de données textuelles

Participants : Annie Morin, Rodolphe Priam.

Il existe actuellement des outils permettant de mesurer la similarité, notamment entre des documents disponibles sur le web. Les questions que l'on se pose sont, entre autres, comment ne pas se perdre en navigant dans ces gisements et comment dégager des informations pertinentes de cette masse de données. Nous nous plaçons délibérément dans un contexte de données textuelles. L'information arrive par flux et peut être soit numérique, soit textuelle. Les données numériques sont structurées ou marquées. Notre hypothèse de travail est qu'il s'agit d'une grande masse de données qui possède une structure minimale constituée par un marqueur de séparation de message, un message étant une unité textuelle autonome. C'est le cas de

textes saisis directement sur ordinateur par un opérateur, mais c'est aussi le cas de données résultant d'enquêtes répétitives par sondage, comme celles qui sont organisées pour étudier le comportement et la satisfaction d'utilisateurs de services divers ou encore de documents dans des bases de données documentaires.

La réponse apportée actuellement dans la littérature au traitement de données textuelles tourne autour de plusieurs sujets à savoir :

- la récupération d'information de provenances et de formats divers,
- l'indexation automatique de gros corpus textuels et leur classement par thèmes,
- l'interrogation et l'utilisation des bases d'information (classement par thèmes).

Nous travaillons à développer une stratégie pour la classification d'unités textuelles autonomes et pour procéder à leur indexation dynamique. D'une part, il s'agit de décrire les données avec étude de fréquence et constitution de dictionnaire. D'autre part, il s'agit de déterminer le vocabulaire minimal caractérisant un domaine. Ce vocabulaire minimal que nous appellerons les sélecteurs servira a posteriori à coder des documents.

La méthode est basée essentiellement sur l'analyse factorielle des correspondances et sur la classification ascendante hiérarchique. Dans une première étape, on fait le dictionnaire des mots, avec calcul de la fréquence des mots et fréquence de leur occurrence. Un tableau de correspondances entre les 1000 premiers mots classés par ordre décroissant de fréquence et les documents (il peut s'agir de messages sur le web ou de résumés d'articles) de l'échantillon est constitué. Ce tableau, dont on élimine les documents ayant moins d'un certain nombre d'occurrences de mots, est soumis à une analyse factorielle des correspondances (AFC), puis à une classification automatique hiérarchique (CAH) sur les facteurs, afin de segmenter l'échantillon en classes relativement homogènes.

L'analyse factorielle systématique de ces classes permet de récupérer, pour chaque facteur, deux groupes de mots ayant une contribution à la valeur propre du facteur supérieure à 2 fois la valeur moyenne des contributions. Ces mots sont appelés des **méta clés** quand on a pour objectif l'indexation des textes.

Nous avons utilisé ces méthodes pour une exploration thématique dans des corpus issus du Monde Diplomatique [46] et nous les utilisons actuellement pour une étude des résumés en français des rapports internes publiés à l'Inria entre 1989 et 1998 [45]. La même étude sera faite sur les résumés en anglais.

Actuellement Rodolphe Priam démarre une thèse sur l'effet des seuils utilisés en AFC sur la pertinence de l'information récupérée, et sur une alternative du type cartes de Kohonen à l'AFC. Par ailleurs, nous travaillons en étroite collaboration avec Michel Kerbaol et Jean-Yves Bansard du Laboratoire de Santé Publique de l'université de Rennes 1 pour le développement du logiciel.

6.8 Manipulation de connaissances

Participant : Pierre-Yves Glorennec.

La manipulation de connaissances à partir de données numériques comprend

- l'extraction de connaissances,
- leur remise à jour en fonction de l'expérience.

Dans cette optique, nous utilisons le formalisme de la logique floue, qui permet l'expression des connaissances sous une forme très proche du langage naturel. Des méthodes d'optimisation spécifiques [8], respectant la sémantique des règles floues, ont été développées dans deux domaines :

- l'apprentissage supervisé,
- l'apprentissage par renforcement.

Actuellement, nous travaillons sur l'extraction de connaissances dans des espaces de «grande» dimension, là où les méthodes floues usuelles ont des problèmes d'explosion combinatoire [38]. L'approche retenue utilise des méthodes de classification.

7 Contrats industriels (nationaux, européens et internationaux)

7.1 Diagnostic de pannes dans les réseaux de télécommunications — Projet exploratoire RNRT Magda

Voir module 6.2. Contrat Inria 2 98 C 561 00 MPR 01 1 — novembre 1998/mai 2001

Participants : Éric Fabre, Laurie Ricker, Mark Smith, Albert Benveniste.

Mots clés : gestion de réseau, supervision, gestion d'alarmes, diagnostic, système distribué, réseau de Petri, HMM.

Glossaire :

Gestion de réseau Désigne la couche haute de gestion d'un réseau de télécommunications (surveillance, maintenance, etc.)

Supervision Opérations de surveillance, de diagnostic et de reconfiguration du réseau.

Gestion d'alarmes Opérations de traitement, de filtrage et d'interprétation des alarmes circulant sur le réseau.

Diagnostic Interprétation des alarmes en vue des opérations de reconfiguration et de maintenance.

HMM voir module 6.2.

Cette activité est partagée avec le projet Pampa (Claude Jard). Elle se situait initialement dans le cadre de la CTI-Cnet 95 1B 151, et se prolonge depuis fin 1998 par le projet exploratoire RNRT Magda (Modélisation et Apprentissage pour une Gestion Distribuée des Alarmes). Il s'agit de développer une approche systématique pour le diagnostic de pannes dans les réseaux de télécommunications, avec les objectifs suivants :

- prendre en compte explicitement le caractère distribué des réseaux,
- suivre une approche «modèle», modèle dont découlera automatiquement l'algorithme de diagnostic,
- prendre en compte les aléas (perte d'alarme, confusions possibles, etc.),
- viser une mise en œuvre du logiciel de diagnostic qui soit répartie sur le réseau.

Une technologie originale, fondée sur une notion nouvelle de réseau de Petri stochastique, conforme au point de vue dit de la «concurrence vraie», a été développée. Cette technologie nous permet naturellement de prendre en compte toutes les contraintes qui résultent du contexte distribué où nous nous situons.

Le projet RNRT Magda, labellisé en septembre 1998, se propose de tester «en grand» cette approche sur un cadre plus industriel. Participent à ce projet, outre les projets Pampa et Sigma2, également le projet Aïda de l'Irisa, le Cnet, Alcatel, Ilog, et l'université de Paris-Nord. Les deux industriels utilisateurs doivent apporter un cas d'étude réseau, Alcatel apporte en outre une plate-forme de gestion qui inclut déjà des outils de Ilog (sur base de Ilog-rules).

7.2 Détection précoce et localisation de défauts dans des appareils électriques — Contrat Schneider Electric

Contrat Inria 1 99 C 271 00 31 321 01 2 — avril 1999/novembre 1999.

Participants : Qinghua Zhang, Michèle Basseville.

La fiabilité et la maintenance préventive deviennent stratégiques dans les produits de distribution électrique et de contrôle industriel. Dans le cadre d'une collaboration avec Schneider Electric, cette étude a pour objectif d'appliquer et d'évaluer des techniques récentes de détection et de diagnostic de défauts visant à assurer le meilleur compromis précocité/fiabilité des alarmes, sur un produit de distribution électrique. Les différentes techniques reposent sur des modélisations dynamiques du procédé surveillé, et font appel à des méthodes statistiques.

7.3 Identification dynamique du comportement d'un véhicule routier — Contrat Renault

Contrat Inria 1 99 C 271 00 31 321 01 2 — mars 1999/janvier 2002.

Participants : Arnaud Clavel, Qinghua Zhang, Bernard Delyon.

Les véhicules routiers, automobiles et poids-lourds, présentent des comportements parfois instables en fonction notamment de la vitesse, de l'adhérence de la route, ou de leur chargement. Afin de corriger le comportement dynamique de ces véhicules et d'éviter des accidents, de nouveaux systèmes électroniques sont actuellement à l'étude chez Renault et chez ses équipementiers. Dans le cadre d'une convention Cifre, cette étude a pour objectif de concevoir et de mettre en œuvre des méthodes d'identification hors-ligne puis en-ligne répondant aux besoins d'estimation de certains paramètres essentiels pour les lois de commande d'un véhicule, tels que l'adhérence, la masse du véhicule, la hauteur du centre de gravité, ainsi que certains paramètres concernant le comportement latéral des pneumatiques.

7.4 Analyse de structures vibrantes — Projet Eureka Sinopsys

Voir modules 4.1 et 6.1. Contrat Inria 2 96 C 295 00 31301 00 6 — novembre 1996/octobre 1999.

Participants : Laurent Mevel, Albert Benveniste, Michèle Basseville.

Le projet Sigma2 participe, en collaboration avec le projet Meta2 (Maurice Goursat), au projet Eureka-Sinopsys sur l'analyse de structures vibrantes en ambiance de travail. Outre l'Inria, sont membres de ce projet LMS (maître d'œuvre), ISMC et KUL (Belgique), Sopemea et Centrale Recherche (France), VUM (Royaume-Uni), université de Cracovie et PZL-Swidnik (Pologne), Saab-Scania (Suède).

L'objectif du projet est le transfert de l'ensemble de l'algorithmique développée depuis 1980 dans les projets Sigma2 et Meta2 (Maurice Goursat), pour l'analyse de structure en ambiance de travail — les excitations sont donc naturelles et non observées. Les résultats du projet sont, pour ce qui nous concerne, les suivants :

- Nous avons participé à la mise au point et aux expérimentations des *méthodes de sous-espace* pour l'analyse de structure en opération. Comme résultat du projet Sinopsys, la société LMS a commercialisé le module Inop attaché à l'environnement Cada_x. Présenté pour la première fois lors de la conférence Imac'99, ce module connaît maintenant un rapide succès. Il a été en particulier testé sur les données du vol d'essai Ariane 501.
- Laurent Mevel, en tant qu'ingénieur expert mis à disposition de la société LMS, a développé un prototype expérimental étroitement intégré dans l'environnement Cada_x, qui met en œuvre les méthodes de surveillance par sous-espace, voir module 6.1. Ces méthodes permettent, sur des données en opération, 1/ de détecter l'apparition de fatigues, 2/ d'évaluer quels sont les modes les plus affectés, et 3/ d'en diagnostiquer la cause. Seuls les points 1/ et 2/ ont, pour l'instant, été industrialisés. L'objectif de cette industrialisation prototype est le beta-test chez des clients sélectionnés, permettant ainsi leur test extensif et dégageant leur domaine d'utilisation.
- Au sein du projet Meta2, Maurice Goursat a développé une boîte à outils pour le «freeware» Scilab mettant en œuvre les mêmes techniques, indépendamment de l'environnement industriel de la société LMS. Il s'agit donc d'une mise en œuvre se focalisant sur la qualité de l'algorithmique, et qui ne vise pas à fournir l'ensemble des services lourds dont le mécanicien a besoin. Cette boîte à outils sera distribuée à partir de 2000.

Cette coopération nous paraît absolument exemplaire. Elle est d'ailleurs destinée à se poursuivre, en particulier grâce au recrutement de Laurent Mevel comme CR Inria en 1999. Une demande de réseau européen TMR a été déposée, dans lequel nous sommes responsables du thème *détection des fatigues*, et un nouveau projet Eureka est en préparation, en vue de la conception d'un système industriel embarqué de surveillance de structures.

7.5 Indexation sonore — Projet pré-compétitif RNRT Agir

Voir module 6.7. Contrat Inria 2 99 C 006 00 00 MPR 01 1 — septembre 1999/février 2001.

Participants : Frédéric Bimbot, Bernard Delyon, Ivan Magrin-Chagnolleau.

Le projet Sigma2 participe, en collaboration avec les projets Vista et Movi, au projet pré-compétitif RNRT Agir, sur le thème de l'indexation sonore. Outre l'Inria, les partenaires du projet sont : Alcatel, Afnor, Arts Video Interactive, Ina, Int Evry, Irit, Lip6.

7.6 Gestion d'archives audio-visuelles — Projet Esprit Divan

Voir module 6.7. Contrat Inria 1 97 C 696 00 00 MPR 00 5 — septembre 1997/février 2000.

Participants : Frédéric Bimbot, Bernard Delyon, Mouhamadou Seck, Didier Zugaj.

Le projet Sigma2 participe, en collaboration avec le projet Vista, au projet Esprit Divan (N° 24956) : *Distributed audio-Visual Archives Network*. Ce projet consiste à mettre au point un prototype de système de gestion d'archives audio-visuelles. Le coordinateur de ce

projet est Intracom (Grèce). Outre l'Inria, les partenaires du projet sont : Tecmath et THD-Ito (Allemagne), Ina (France), RAI (Italie), ERT et ICS-Forth (Grèce),

7.7 Vérification du locuteur — Projet Telematics Picasso

Voir module 6.7 — janvier 1998/juin 2001

Participants : Frédéric Bimbot, Bruno Jacob.

Le projet Sigma2 participe au projet Telematics Picasso sur la vérification du locuteur à travers le réseau téléphonique, principalement en mode dépendant du texte. Notre équipe est notamment chargée de la supervision des activités de recherche au sein du consortium (*Work Package Management*). Outre l'Inria, les partenaires du projet sont : KPN Telecom (maître d'œuvre), KPN Research et KUN (Pays-Bas), Fortis (Pays-Bas/Belgique), KTH (Suède), Vocalis (Royaume-Uni), ENST (France), Swiss Telecom, Idiap et UBS Ubilab (Suisse).

7.8 Reconnaissance du locuteur — Contrat Bull

Voir module 6.7. Contrat Inria 1 99 c 138 00 31 321 01 2 — décembre 1998/novembre 2001.

Participants : Frédéric Bimbot, Raphaël Blouet.

Une convention de recherche a été signée avec Bull pour développer et perfectionner, dans le cadre d'une thèse, des algorithmes et des procédés de vérification du locuteur dans le cas d'architectures de traitement distribuées, certains traitements pouvant être réalisés sur le terminal, d'autres étant centralisés. Ceci introduit des contraintes spécifiques de rapidité de traitement et de modularité.

7.9 Commande floue de bâtiments solaires — Projet Joule-Thermie

Voir module 6.8 — janvier 1998/décembre 1999

Participant : Pierre-Yves Glorennec.

Le projet Sigma2 participe au projet Joule-Thermie (Jor3 CT97 0076) intitulé *Development and Test of Modern Control Techniques Applied to Solar Buildings*. Les partenaires du projet sont : ISFH et Inga (Allemagne), Ful (Belgique), UNN (Royaume-Uni), NOA (Grèce). L'objectif est de mettre au point, tester et comparer différents systèmes de régulation pour des bâtiments présentant une fraction solaire élevée. Différentes approches sont ainsi testées : la commande prédictive, la commande neuronale et la commande floue. Les algorithmes développés ont en commun :

- la prise en compte de l'énergie solaire dans la stratégie de commande,
- l'auto-adaptation des régulateurs pour chaque type de bâtiment et de conditions climatiques,
- la prévision des conditions climatiques sur une période suffisante (plusieurs heures à un jour).

Les algorithmes doivent être implémentés sur micro-contrôleur et testés en conditions réelles. Plusieurs plate-formes expérimentales ont été choisies, dont une crèche municipale à Rennes.

Notre approche utilise un modèle de Wiener flou [33] et un contrôleur flou de type proportionnel-intégral : une suite de commande est testée et optimisée à l'aide du modèle sur un horizon de quelques heures, puis la première commande de la suite est appliquée au système de chauffage réel.

8 Actions régionales, nationales et internationales

8.1 Actions de recherches coopératives (Arc)

8.1.1 Analyse à court et moyen terme de la variabilité du rythme cardiaque

Participant : Bernard Delyon.

Nous achevons, en collaboration avec le projet Sosso et dans le cadre de l'action de recherche coopérative Inria Cardio, la mise au point d'un algorithme de détection des principaux événements de l'électrocardiogramme (ECG) : sommet de l'onde P, début de l'onde Q, sommet de l'onde R, sommet et fin de l'onde T. Un algorithme de même type est en cours de mise au point pour la détection des quatre événements majeurs du signal de pression artérielle. Ces algorithmes sont écrits en Scilab.

Une deuxième étude vient de démarrer. Elle porte sur l'analyse des vectocardiogrammes, qui sont constitués de plusieurs électrocardiogrammes mesurés simultanément en différentes parties du corps. Pour des raisons physiologiques, ce signal vectoriel vit «théoriquement» dans un espace de dimension 2. Cette propriété peut permettre de reconstituer le signal lorsqu'au moins deux des signaux sont présents (ce qui est utile car les mesures sont souvent entachées de fortes altérations, si par exemple le patient transpire là où la mesure est prise,...). De plus une étude fine de la dynamique spatiale du signal est envisagée pour permettre de caractériser certaines pathologies.

8.1.2 Système générique de reconnaissance de parole — Sirocco

Voir module 6.7. Durée du financement : 12 mois

Participants : Bruno Jacob, Frédéric Bimbot.

Commencé fin 1997 à l'initiative de plusieurs laboratoires, le projet Sirocco a pour objectif de mettre en place une plate-forme commune de reconnaissance de parole grand-vocabulaire. Ce projet, qui regroupe ENST, Irisa, Irit, Lia et Loria est devenu en 1999 une action de recherche coopérative de l'Inria. L'Irisa est plus particulièrement concentré sur le module de décodage rapide de parole continue par recherche en faisceaux (*Beam-Search*).

8.2 Actions régionales

Une collaboration a eu lieu en 1999 entre le projet Sigma2 et la Sacet. Cette collaboration s'inscrit dans le cadre du programme d'accueil de post-doctorants par les PME/PMI, initié par le MENRT. Le sujet abordé a concerné la conception et l'évaluation de codes correcteurs courts pour les télécommunications. Les travaux ont porté sur la combinaison de codes-blocs courts (sur le schéma des turbo-codes) et la conception d'algorithmes de décodage adaptés.

8.3 Actions nationales

Le consortium Elisa a été formé en 1998 par plusieurs laboratoires (ENST, EPFL, Idiap, Irisa, Lia), pour partager les efforts nécessaires à la participation aux campagnes d'évaluation Nist en vérification du locuteur. Le consortium s'est étendu à plusieurs autres laboratoires en 1999, et l'Irisa a participé à nouveau aux évaluations Nist dans ce contexte. Ce projet ne bénéficie actuellement d'aucun soutien financier extérieur.

F. Le Gland et F. Céroü participent au projet de recherche «Méthodes Particulières et Filtrage non Linéaire», dans le cadre du programme «Modélisation et Simulation Numérique» du CNRS. Ce projet associe outre l'Irisa, le laboratoire de Statistiques et Probabilités de l'université Paul Sabatier, l'équipe de Modélisation Stochastique et Statistique de l'université de Paris-Sud, le laboratoire d'Analyse, Topologie et Probabilités de l'université de Provence, l'Onera DTIM/MCT, et le département de mathématiques d'Imperial College, Londres.

8.4 Actions européennes

Les membres de l'équipe participent à un réseau européen du programme TMR intitulé TMR-SI (System Identification), qui regroupe huit équipes de recherche européennes¹. Le séminaire annuel organisé cette année par l'équipe Inria Sophia-Antipolis s'est tenu à Théoule sur mer du 27 au 29 septembre. La participation de l'Irisa se fait surtout dans le domaine des systèmes, de l'identification non-paramétrique et de l'identification pour la surveillance. Dans le cadre de ce réseau, L. Mevel a effectué un séjour post-doctoral de quatre mois au Ladseb/CNR, voir module 6.5.

F. Bimbot a été évaluateur de l'action européenne Cost'250 sur la vérification du locuteur au téléphone.

8.5 Actions internationales

J.-J. Fuchs a été sollicité pour l'évaluation de plusieurs projets TFR (Swedish Research Council for Engineering Sciences).

F. Céroü a été invité pour six mois, de janvier à juin 1999, au département de recherche opérationnelle et d'ingénierie financière (Orfe) de l'université de Princeton, dans le cadre d'une mise en disponibilité, voir module 6.6.

F. Bimbot a effectué une visite de 3 mois chez AT&T Labs département HA154 (Florham Park), où il a travaillé avec Roberto Pieraccini et Esther Levin sur la modélisation de l'utilisateur d'un système de dialogue.

P.-Y. Glorennec est responsable d'un programme de coopération post-graduée avec l'université Simon Bolivar de Caracas, Vénézuéla.

1. CWI (Pays-Bas), Technische Universität Wien (Autriche), université catholique de Louvain (Belgique), Inria Sophia-Antipolis et Irisa/université de Rennes 1 (France), université de Cambridge (Royaume-Uni), Ladseb et université de Padoue (Italie), Royal Institute of Technology et université de Linköping (Suède).

8.6 Visites, et invitations de chercheurs

Monica Becue (Universitat Politècnica de Catalunya), a séjourné deux mois dans le projet, et a travaillé avec Annie Morin sur l'analyse de données textuelles.

Rufus Fraanje (TU Delft) a séjourné pendant trois semaines dans le projet, pour des discussions approfondies sur la détection de pannes.

Johnny Mariéthoz (Idiap) a séjourné pendant un mois dans le projet, pour travailler sur la personnalisation et l'apprentissage incrémental du mot de passe du locuteur, dans le cadre du projet Telematics Picasso, voir module 7.7.

9 Diffusion de résultats

9.1 Animation de la communauté scientifique

M. Basseville est membre du comité de direction du GDR-PRC Isis (Information, Signal, ImageS).

A. Benveniste est membre de la direction du GDR-PRC Automatique.

F. Bimbot est président du GFCP (Groupe Francophone en Communication Parlée), groupe spécialisé de la SFA (Société Française d'Acoustique). Il est également membre du bureau de l'Esca (European Speech Communication Association), chargé des bourses et des prix, et membre du bureau du Special Interest Group de l'Esca sur la Caractérisation du Locuteur et de la Langue.

F. Bimbot est par ailleurs animateur scientifique de l'action de recherche concertée de l'Aupelf sur l'évaluation des systèmes de dictée vocale.

M. Basseville est éditeur associé du journal Ifac *Automatica* et du journal *Mechanical Systems and Signal Processing*. Elle a été editeur invité, en collaboration avec Thomas Parisini (Politecnico di Milano), d'un numéro spécial de IJACSP (International Journal of Adaptive Control and Signal Processing) intitulé: Fault Detection and Isolation, et en collaboration avec Étienne Balmès (École Centrale Paris), d'une section spéciale d'un numéro de MSSP (Mechanical Systems and Signal Processing), intitulée: Model-based structural identification and monitoring using in-operation data.

A. Benveniste est membre du comité éditorial des revues *European Journal of Control*, *Discrete Event Dynamic Systems* et *Proceedings of the IEEE*.

J.-J. Fuchs est éditeur associé pour la revue IEEE *Transactions on Signal Processing*.

M. Basseville est membre du groupe de travail WG2 (Health monitoring and damage detection), du Cost F3 (Structural dynamics).

M. Basseville est membre du comité technique Ifac IAF-TC (Fault detection, supervision and safety of technical processes), relevant du comité de coordination IA-CC (Industrial applications). M. Basseville et J.-J. Fuchs sont membres du comité technique Ifac SSM-TC (Modelling, identification and signal processing), relevant du comité de coordination SSM-CC (Systems and signals).

M. Basseville est membre des comités internationaux de programme de Damas'2001 (Damage Assessment in Structures), Sydif'2000, et Safeprocess'2000.

J.-J. Fuchs est membre du comité technique IEEE Sam «*Sensor Array and Multichannel*» qui organise le workshop Asap 2000 et Sam 2000 du 14 au 17 mars 2000 à Cambridge, MA.

F. Bimbot est membre du Comité Scientifique des XXIII^{es} Journées d'Etude sur la Parole (Aussois, 2000).

P.-Y. Glorennec est membre du comité de programme de LFA (Logique Floue et ses Applications). Il est membre du bureau du club Crin Iti (Ingénierie du Traitement de l'Information), responsable d'un GT sur la fouille de données. M. Basseville participe au GT «Aide au Diagnostic» du club Crin Iti.

9.2 Actions d'enseignement

Le projet intervient de façon importante dans le DEA-Stir (Signal, Télécommunications, Images, Radar) de l'université de Rennes 1, associé au DEA informatique de l'Ifsic dans une école doctorale commune intitulée «Sciences pour l'Ingénieur»: J.-J. Fuchs y enseigne l'«Optimisation» et l'«Estimation spectrale». F. Le Gland y enseigne le «Filtrage de Kalman et les chaînes de Markov cachées».

F. Bimbot enseigne le Traitement de la Parole au DEA-TIS de l'université de Cergy-Pontoise, ainsi qu'à l'Esiea, à l'Eisti et à l'INT.

É. Fabre et Q. Zhang participent aux enseignements d'«Optimisation» au Diic de l'Ifsic, université de Rennes 1.

É. Fabre enseigne la théorie de l'information et les codes correcteurs d'erreurs à l'Esiea de Laval.

Q. Zhang enseigne la modélisation boîte-noire à l'Ensar.

A. Morin enseigne l'analyse des données en DESS de mathématiques, et la maîtrise statistique des processus en DESS Composants micro-électroniques.

P.-Y. Glorennec donne des cours sur les réseaux de neurones et la logique floue aux antennes Rennaises de Supélec et de l'ENS Cachan, à l'Ensar et à l'Ensaï.

9.3 Participation à des colloques, conférences invitées, tutoriels, cours, etc.

F. Le Gland a exposé au workshop «Statistical Inference for Stochastic Processes» qui a eu lieu en mai à Fribourg (Allemagne). N. Oudjane a exposé au workshop HSSS «On-line Monte Carlo Filtering and Prediction» qui a eu lieu en juin à Pavie. F. Cérrou, F. Le Gland et N. Oudjane ont exposé au workshop «Theoretical and Practical Aspects of Particle Filters» qui a eu lieu en décembre à Cambridge (Grande-Bretagne).

F. Bimbot a été un des conférenciers invités au workshop du Cost'250 à Rome, du 10 au 12 novembre 1999.

P.-Y. Glorennec a donné un tutoriel au workshop IAR «Intelligent Techniques for Information Processing and Applications», à Nancy, en décembre 1999 [34].

10 Bibliographie

Ouvrages et articles de référence de l'équipe

- [1] A. AGHASARYAN, E. FABRE, A. BENVENISTE, R. BOUBOUR, C. JARD, « Fault detection and diagnosis in distributed systems: an approach by partially stochastic Petri nets », *Journal of Discrete Events Dynamical Systems, special issue on Hybrid Systems* 8, 2, juin 1998, p. 203–231.
- [2] M. BASSEVILLE, I. NIKIFOROV, *Detection of Abrupt Changes — Theory and Applications, Information and System Sciences Series*, Prentice Hall, Englewood Cliffs, 1993, <http://www.irisa.fr/sigma2/kniga/>.
- [3] A. BENVENISTE, B. LEVY, E. FABRE, P. LE GUERNIC, « A Calculus of Stochastic Systems: Specification, Simulation, and Hidden State Estimation », *Theoretical Computer Science* 152, 2, 1995, p. 171–217.
- [4] A. BENVENISTE, M. MÉTIVIER, P. PRIOURET, *Adaptive Algorithms and Stochastic Approximations, Applications of Mathematics*, 22, Springer Verlag, New York, 1990.
- [5] J.-J. FUCHS, « Extension of the Pisarenko method to sparse linear arrays », *IEEE Transactions on Signal Processing SP-45*, 10, octobre 1997, p. 2413–2421.
- [6] A. JUDITSKY, H. HJALMÄRSSON, A. BENVENISTE, B. DELYON, L. LJUNG, J. SJÖBERG, Q. ZHANG, « Non-linear black-box modelling in system identification: mathematical foundations », *Automatica* 31, 12, décembre 1995, p. 1725–1750.
- [7] J. SJÖBERG, Q. ZHANG, L. LJUNG, A. BENVENISTE, B. DELYON, P.-Y. GLORENNEC, H. HJALMÄRSSON, A. JUDITSKY, « Non-linear black-box modelling in system identification: a unified overview », *Automatica* 31, 12, décembre 1995, p. 1691–1724.

Livres et monographies

- [8] P.-Y. GLORENNEC, *Algorithmes d'Apprentissage pour Systèmes d'Inférence Floue*, Hermès, Paris, 1999.

Thèses et habilitations à diriger des recherches

- [9] J.-L. LE CALVEZ, *Algorithmes d'Identification de Modèles ARMA: Cas avec Ordres Inconnus et Cas non Stationnaire*, Thèse de doctorat, université de Rennes 1, février 1999, <ftp://ftp.irisa.fr/techreports/theses/1999/lecalvez.ps.gz>.
- [10] S. LE POTIER, *Optimisation Stochastique Distribuée: Le Problème de l'Affectation Dynamique de Canal sur un Réseau Cellulaire*, Thèse de doctorat, université de Rennes 1, décembre 1999.
- [11] N. MOAL, *Programmation Quadratique Appliquée à l'Estimation et à la Détection de Sinusoïdes*, Thèse de doctorat, université de Rennes 1, octobre 1999.
- [12] Q. ZHANG, *Identification et Surveillance de Systèmes Dynamiques*, Habilitation à diriger des recherches, université de Rennes 1, janvier 1999.

Articles et chapitres de livre

- [13] M. ABDELGHANI, M. GOURSAT, T. BIOLCHINI, « On-line modal monitoring of aircraft structures under unknown excitation », *Mechanical Systems and Signal Processing* 13, 6 (Special Section on Model-Based Structural Identification and Monitoring Using in-Operation Data), novembre 1999, p. 839–854.
- [14] M. BASSEVILLE, M. ABDELGHANI, A. BENVENISTE, « Subspace-based fault detection algorithms for vibration monitoring », *Automatica* 36, 1, janvier 2000, p. 101–109.

- [15] M. BASSEVILLE, « An invariance property of some subspace-based detection algorithms », *IEEE Transactions on Signal Processing SP-47*, 12, décembre 1999.
- [16] D. BRIGO, B. HANZON, F. LE GLAND, « Approximate filtering by projection on the manifold of exponential densities », *Bernoulli* 5, 3, juin 1999, p. 495–534.
- [17] R. A. CARMONA, F. CÉROU, « Transport by incompressible random velocity fields : simulations & mathematical conjectures », in : *Stochastic Partial Differential Equations : Six Perspectives*, R. A. Carmona et B. L. Rozovskii (éditeurs), *Mathematical Surveys and Monographs*, 64, AMS, Providence, RI, 1999, ch. 4, p. 153–181.
- [18] F. CÉROU, « Long time behaviour for some dynamical noise-free nonlinear filtering problems », *SIAM Journal on Control and Optimization*, à paraître.
- [19] J.-M. DOLMAZON, F. BIMBOT *et al.*, « Première campagne AUPELF d'évaluation des systèmes de dictée vocale : organisation et résultats », in : *Ressources et Évaluation en Ingénierie de la Langue*, K. Chibout, J.-J. Mariani, N. Masson, et F. Néel (éditeurs), *Champs Linguistiques*, Duculot, Louvain-la-Neuve.
- [20] J.-J. FUCHS, « Multipath time-delay detection and estimation », *IEEE Transactions on Signal Processing SP-47*, 1, janvier 1999, p. 237–243.
- [21] A. JUDITSKY, B. DELYON, « On minimax prediction for non-parametric autoregression models », *Probability Theory and Related Fields*, à paraître.
- [22] F. LE GLAND, L. MEVEL, « Basic properties of the projective product, with application to products of column-allowable nonnegative matrices », *Mathematics of Control, Signals and Systems*, à paraître.
- [23] F. LE GLAND, L. MEVEL, « Exponential forgetting and geometric ergodicity in hidden Markov models », *Mathematics of Control, Signals and Systems*, à paraître.
- [24] L. MEVEL, L. HERMANS, H. VAN DER AUWERAER, « On the application of subspace-based fault detection methods to industrial structures », *Mechanical Systems and Signal Processing* 13, 6 (Special Section on Model-Based Structural Identification and Monitoring Using in-Operation Data), novembre 1999, p. 823–838.

Communications à des congrès, colloques, etc.

- [25] M. ABDELGHANI, M. BASSEVILLE, A. BENVENISTE, L. MEVEL, E. BALMÈS, L. HERMANS, H. VAN DER AUWERAER, « Assessment of subspace fault detection algorithms on a realistic simulator-based example », in : *Proceedings of the 17th International Modal Analysis Conference (IMAC-XVII)*, Kissimmee, SEM, Inc., p. 249–255, février 1999. Conférence invitée.
- [26] M. ABDELGHANI, L. HERMANS, H. VAN DER AUWERAER, « A state space approach to output-only vibro-acoustical modal analysis », in : *Proceedings of the 17th International Modal Analysis Conference (IMAC-XVII)*, Kissimmee, SEM, Inc., p. 1789–1793, février 1999.
- [27] M. BASSEVILLE, « On fault detectability and isolability », in : *Proceedings of the 5th European Control Conference (ECC'99)*, Karlsruhe, 1999.
- [28] F. BIMBOT *et al.*, « An overview of the PICASSO project research activities in speaker verification for telephone applications », in : *Proceedings of EURO-SPEECH'99*, Budapest, 5, p. 1963–1966, septembre 1999.
- [29] E. FABRE, « Mixing probabilities and constraints in conditional independance structures », in : *Fields Institute Workshop on Conditional Independence Structures and Graphical Models*, Toronto, septembre 1999. Résumé.
- [30] J.-J. FUCHS, F. LE CHEVALIER, « Détection d'une cible mobile en présence de fouillis à l'aide d'un radar très large bande », in : *17ème Colloque GRETSI*, Vannes, p. 532–534, septembre 1999.

- [31] J.-J. FUCHS, « An inverse problem approach to robust regression », *in: 24th IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing (ICASSP), Phoenix, Volume IV, IEEE-SPS*, p. 1809–1812, mai 1999.
- [32] J.-J. FUCHS, « A new approach to robust linear regression », *in: Proceedings of the IFAC World Congress, Beijing, Volume H*, p. 427–432, juillet 1999.
- [33] P.-Y. GLORENNEC, « A fuzzy Wiener model », *in: Proceedings of the IAR Workshop on Intelligent Techniques for Information Processing, Nancy, IAR*, décembre 1999.
- [34] P.-Y. GLORENNEC, « Reinforcement learning », *in: Proceedings of the IAR Workshop on Intelligent Techniques for Information Processing, Nancy, IAR*, décembre 1999. Tutoriel.
- [35] L. HERMANS, M. BRUGHMANS, H. VAN DER AUWERAER, L. MEVEL, « Damage detection of a concrete three-span bridge: A case study », *in: Proceedings of DYMACE'99, Integrating Dynamics, Condition Monitoring and Control for the 21st Century, Manchester*, p. 567–573, 1999.
- [36] L. HERMANS, M. BRUGHMANS, H. VAN DER AUWERAER, L. MEVEL, « Damage diagnosis in a concrete three-span bridge: A case study », *in: Proceedings of the 1999 SEM Annual Conference on Theoretical, Experimental, and Computational Mechanics, Cincinnati, SEM, Inc.*, juin 1999. Paper 192.
- [37] L. HERMANS, H. VAN DER AUWERAER, L. MEVEL, « Health monitoring and detection of a fatigue problem of a sports car », *in: Proceedings of the 17th International Modal Analysis Conference (IMAC-XVII), Kissimmee, SEM, Inc.*, p. 42–48, février 1999. Conférence invitée.
- [38] D. KADI, G. LOMBARDO, P.-Y. GLORENNEC, « Systèmes d'inférence floue dans des espaces de «grande» dimension », *in: Rencontres Francophones sur la Logique Floue et ses Applications (LFA), Valenciennes*, octobre 1999.
- [39] F. LE GLAND, « Stability and approximation of nonlinear filters: an information theoretic approach », *in: Proceedings of the 38th Conference on Decision and Control, Phoenix, IEEE-CSS*, p. 1889–1894, décembre 1999.
- [40] E. MARGAGLIO, P.-Y. GLORENNEC, A. MARCHAND, L. GUIHARD, « Optimal control of a batch distillation column with fuzzy inference systems », *in: Proceedings of SOCO'99, Genova*, juin 1999.
- [41] J. MARIÉTHOZ, D. GENOUD, F. BIMBOT, C. MOKBEL, « Client / world model synchronous alignment for speaker verification », *in: Proceedings of EUROSPEECH'99, Budapest, 5*, p. 1979–1982, septembre 1999.
- [42] L. MEVEL, M. BASSEVILLE, A. BENVENISTE, M. GOURSAT, M. ABDELGHANI, L. HERMANS, « On the application of a subspace-based fault detection method », *in: Proceedings of the 17th International Modal Analysis Conference (IMAC-XVII), Kissimmee, SEM, Inc.*, p. 35–41, février 1999. Conférence invitée.
- [43] L. MEVEL, M. BASSEVILLE, L. HERMANS, « Diagnostic vibratoire embarqué », *in: 17ème Colloque GRETSI, Vannes*, p. 143–146, septembre 1999.
- [44] N. MOAL, J.-J. FUCHS, « Détection et estimation de sinusoides dans du bruit coloré de matrice de covariance inconnue », *in: 17ème Colloque GRETSI, Vannes*, p. 571–574, septembre 1999.
- [45] A. MORIN, « Knowledge extraction in texts: a comparison of two methods », *in: Proceedings of the 52th ISI Session, Helsinki*, août 1999. Résumé.
- [46] A. MORIN, « Latent semantic analysis and correspondence analysis for thematic exploration in texts », *in: Proceedings of AMSDA, Lisbonne*, 1999.
- [47] C. MUSSO, N. OUDJANE, « Méthodes statistiques en filtrage particulière appliqué au pistage », *in: Proceedings of the 5th International Conference on Radar Systems, Brest, SEE*, mai 1999.
- [48] C. MUSSO, N. OUDJANE, « Particle methods for multimodal filtering », *in: Proceedings of the 2nd International Conference on Information Fusion, Sunnyvale, ISIF*, juillet 1999.

- [49] N. OUDJANE, C. MUSSO, « Multiple model particle filter », *in: 17ème Colloque GRETSI, Vannes*, p. 681–684, septembre 1999.
- [50] M. SECK, F. BIMBOT, B. DELYON, « Comparaison de critères de segmentation par détection de ruptures », *in: 17ème Colloque GRETSI, Vannes*, p. 989–992, septembre 1999.
- [51] M. SECK, F. BIMBOT, D. ZUGAJ, B. DELYON, « Two-class signal segmentation for speech/music detection in audio tracks », *in: Proceedings of EUROSPEECH'99, Budapest, 6*, p. 2801–2804, septembre 1999.
- [52] L. TROMP, A. BENVENISTE, M. BASSEVILLE, « Fault detection and isolation in hybrid systems: a Petri net approach », *in: Proceedings of the IFAC World Congress, Beijing*, juillet 1999.
- [53] Q. ZHANG, M. BASSEVILLE, « Local approach to FDI in nonlinear dynamical systems », *in: Proceedings of the 5th European Control Conference (ECC'99), Karlsruhe*, 1999.
- [54] Q. ZHANG, J.-J. FUCHS, « Building neural networks through linear programming », *in: Proceedings of the IFAC World Congress, Beijing*, juillet 1999.
- [55] Q. ZHANG, M. SAMAN, M. BASSEVILLE, « Detection and isolation of faults in a thermal power plant », *in: Proceedings of the IFAC World Congress, Beijing*, juillet 1999. Conférence invitée.

Rapports de recherche et publications internes

- [56] M. BASSEVILLE, « On fault detectability and isolability », *Publication Interne n° 1240*, IRISA, avril 1999, <ftp://ftp.irisa.fr/techreports/1999/PI-1240.ps.gz>.
- [57] M. JOANNIDES, F. LE GLAND, « Small noise asymptotics of the Bayesian estimator in non-identifiable models », *Publication Interne n° 1247*, IRISA, mai 1999, <ftp://ftp.irisa.fr/techreports/1999/PI-1247.ps.gz>.
- [58] Q. ZHANG, « Fault detection and isolation based on adaptive observers for nonlinear dynamic systems », *Publication Interne n° 1261*, IRISA, septembre 1999, <ftp://ftp.irisa.fr/techreports/1999/PI-1261.ps.gz>.

Divers

- [59] M. BASSEVILLE, « Surveillance en fonctionnement — Cas particulier: surveillance des vibrations, projet Eureka Sinopsys », Exposé au GT *Aide au diagnostic* du Club CRIN *Ingénierie du Traitement de l'Information*, janvier 1999.
- [60] M. BASSEVILLE, « Surveillance et diagnostic de systèmes industriels », Journée Inria-Elf, mai 1999.
- [61] G. DREYFUS, P.-Y. GLORENNEC, M. GRABISCH, P. DE LARMINAT, « Complémentarité et spécificité de la logique floue, des réseaux de neurones et de l'automatique linéaire pour la modélisation et la commande de processus », Rapport du Club CRIN *Ingénierie du Traitement de l'Information*, février 1999.