



IRISA • Campus universitaire de Beaulieu • 35042 Rennes Cedex France • Tél. : +33 2 99 84 71 00 • Télécopie : +33 2 99 84 71 71 • Internet : www.irisa.fr

INSTITUT DE RECHERCHE EN INFORMATIQUE ET SYSTÈMES ALÉATOIRES

Projet Sigma 2

Signaux, modèles et algorithmes

Rennes

————— THÈME 4A —————



Table des matières

1	Composition de l'équipe	3
2	Présentation et objectifs généraux	3
3	Fondements scientifiques	5
3.1	Approche asymptotique locale pour la surveillance et le diagnostic des systèmes continus	5
3.2	Inférence statistique des modèles de Markov cachés, et filtrage particulaire	8
3.3	Modèles partiellement stochastiques pour la surveillance des systèmes distribués	12
4	Domaines d'applications	14
4.1	Analyse de structures vibrantes en ambiance de travail	15
4.2	Télécommunications : diagnostic de pannes en gestion de réseaux, turbo-codes, décodage conjoint source-canal	16
5	Logiciels	17
5.1	Nonlinear Modelling Matlab Toolbox	17
5.2	Modal Analysis and Health Monitoring Scilab Toolbox	18
6	Résultats nouveaux	20
6.1	Observateurs adaptatifs pour la surveillance et le diagnostic	20
6.2	Identification et surveillance de systèmes dynamiques linéaires. Application aux structures soumises à vibrations	21
6.3	Aspects statistiques de la détection et du diagnostic de pannes pour les systèmes continus	22
6.4	Applications statistiques des systèmes de particules en interaction	22
6.5	Surveillance des systèmes distribués	25
6.6	Codes correcteurs et modèles graphiques	27
6.7	Radio logicielle et égalisation	29
6.8	Synthèse de filtres numériques	30
7	Contrats industriels (nationaux, européens et internationaux)	30
7.1	Exploitation des données de vol — Projet Eurêka FLITE	30
7.2	Évaluation et surveillance des structures — Réseau Growth SAMCO	32
7.3	Identification du comportement dynamique d'un véhicule routier — Contrat Renault	32
7.4	Modélisation et diagnostic de pannes dans des organes de véhicules automobiles à basse consommation — Contrat Renault	33
7.5	Analyse stochastique et contrôle distribué des systèmes hybrides — Projet IST HYBRIDGE	34
7.6	Diagnostic de pannes dans les réseaux de télécommunications — Projet RNRT exploratoire MAGDA2	34
7.7	Transmission robuste de vidéo vers les mobiles — Projet RNRT précompétitif VIP	35

7.8	Amélioration du calcul du taux d'erreur et diagnostic à partir du diagramme de l'œil — Contrat Alcatel	36
7.9	Optimisation de l'isolation entre faisceaux — Contrat Alcatel Espace	36
8	Actions régionales, nationales et internationales	37
8.1	Chaînes de Markov cachées et filtrage particulière — Action Math-STIC	37
8.2	Méthodes particulières (AS67) — Action spécifique du département STIC	37
8.3	Identification des systèmes — Réseau TMR SI	37
8.4	Méthodes statistiques pour les systèmes dynamiques stochastiques — Réseau IHP DYNSTOCH	38
8.5	Visites, et invitations de chercheurs	38
9	Diffusion de résultats	38
9.1	Animation de la communauté scientifique	38
9.2	Enseignement	39
9.3	Participation à des colloques, séminaires, cours, etc.	40
10	Bibliographie	41

1 Composition de l'équipe

Responsable scientifique

François Le Gland [DR INRIA]

Assistante de projet

Huguette Béchu [depuis le 1^{er} décembre 2002]

Marie-Noëlle Georgeault [jusqu'au 30 novembre 2002]

Stéphanie Lemaile [à temps partiel, du 1^{er} avril au 30 novembre 2002]

Personnel INRIA

Albert Benveniste [DR, à temps partiel]

Fabien Campillo [CR depuis le 1^{er} septembre 2002]

Frédéric Céro [CR]

Éric Fabre [CR]

Stefan Haar [CR]

Laurent Mevel [CR]

Aline Roumy [CR depuis le 1^{er} octobre 2002]

Qinghua Zhang [DR]

Personnel CNRS

Michèle Basseville [DR]

Personnel université de Rennes 1

Jean-Jacques Fuchs [professeur]

Collaborateurs extérieurs

Bernard Delyon [professeur à l'université de Rennes 1]

Arnaud Guyader [ATER à l'université de Rennes 2]

Personnel non permanent INRIA

Bruno Marquié [ingénieur expert, depuis le 15 octobre 2002]

Jacques Palicot [spécialiste industriel, depuis le 1^{er} octobre 2002]

Vincent Pigourier [ingénieur associé, jusqu'au 30 septembre 2002]

Auguste Sam [ingénieur expert, depuis le 1^{er} octobre 2002]

Yann Veillard [ingénieur expert, jusqu'au 30 novembre 2002]

Chercheur post-doctorant INRIA

Bo Wang [jusqu'au 28 février 2002]

Chercheurs doctorants

Samy Abbes [bourse MENRT, reprise au 1^{er} octobre 2002]

Natacha Caylus [bourse MENRT, depuis le 1^{er} octobre 2002]

Arnaud Clavel [bourse CIFRE Renault, jusqu'au 31 janvier 2002]

Olivier Perrin [bourse CIFRE Renault]

Aiping Xu [bourse INRIA, jusqu'au 30 septembre 2002]

2 Présentation et objectifs généraux

Mots clés : identification, surveillance, diagnostic, méthode de sous-espace, approche locale, HMM, filtrage particulière, système distribué, système à évènements discrets, réseau de Petri, modèle

partiellement stochastique, automobile, aéronautique, génie civil, vibration, analyse modale, réseau de télécommunications, gestion d'alarmes, turbo-code, décodage conjoint source-canal.

Les objectifs du projet SIGMA2 sont la conception, l'analyse et la mise en œuvre d'algorithmes statistiques basés sur l'utilisation de modèles, pour l'identification, la surveillance et le diagnostic de systèmes industriels complexes. Les modèles considérés sont d'une part les modèles d'état de l'automatique stochastique, avec une importance croissante des modèles non-linéaires, et d'autre part des modèles partiellement stochastiques (HMM, réseaux de Petri, réseaux d'automates, etc.) sur des structures discrètes (arbres, graphes, etc.), par exemple pour modéliser les systèmes distribués à événements discrets. Les contributions méthodologiques les plus importantes du projet, et qui constituent les bases scientifiques des activités actuelles, concernent l'utilisation de l'approche asymptotique locale pour la surveillance et le diagnostic des systèmes continus, le développement de filtres particulières pour la statistique des HMM à état général, et la conception d'algorithmes répartis de reconstruction d'état, de type Viterbi, pour la surveillance et le diagnostic des systèmes distribués à événements discrets. Les principales applications considérées sont la surveillance et le diagnostic des structures mécaniques en vibration (automobile, aéronautique, génie civil), la surveillance et le diagnostic d'organes de véhicules automobiles, la modélisation du risque dans les applications critiques, et le diagnostic de pannes dans les réseaux de télécommunications.

Axes de recherche

- observateurs et filtres pour la surveillance et le diagnostic des systèmes dynamiques non-linéaires,
- méthodes de sous-espaces pour l'analyse et la surveillance modale,
- inférence statistique des HMM à espace d'état général, et filtrage particulière,
- surveillance et diagnostic des systèmes distribués à événements discrets,
- algorithmes approchés d'estimation d'état dans les modèles graphiques et les réseaux bayésiens, par exemple pour le décodage.

Relations internationales et industrielles

- conventions de recherche : avec Renault sur l'identification du comportement dynamique d'un véhicule routier, et sur la surveillance et le diagnostic d'organes de véhicules automobiles, avec Alcatel sur l'estimation transparente du taux d'erreur dans un réseau optique, avec Alcatel Espace sur l'optimisation de l'isolation entre faisceaux, et sur la turbo-estimation,
- projets multi-partenaires : au niveau national sur le diagnostic de pannes dans les réseaux de télécommunications (RNRT), sur la transmission robuste de vidéo vers les mobiles par protocole IP (RNRT), et au niveau européen sur l'identification et la surveillance de structures vibrantes en ambiance de travail (Eurêka), sur l'exploitation des données de vol sous excitation naturelle pour les essais en vol (Eurêka), sur l'évaluation, la surveillance et le contrôle des structures (Growth), sur le contrôle distribué et l'analyse stochastique des systèmes hybrides (IST),
- réseaux de recherche académiques : au niveau national sur les chaînes de Markov cachées et le filtrage particulière (MathSTIC), sur les méthodes particulières (AS-STIC), au niveau européen sur l'identification des systèmes (TMR), sur les méthodes statistiques pour les systèmes dynamiques stochastiques (IHP).

3 Fondements scientifiques

Le projet SIGMA2 s'intéresse aux techniques de modélisation, à partir de principes physiques et de données d'observation. Les problèmes centraux sont donc l'estimation et l'identification, et 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, distribués à événements discrets. Nous avons choisi de détailler les trois points ci-après, où le projet a apporté des contributions importantes, et qui constituent les bases scientifiques et méthodologiques des activités actuelles.

3.1 Approche asymptotique locale pour la surveillance et le diagnostic des systèmes continus

Voir module 6.2.

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

Glossaire :

Test local Technique statistique permettant de comparer l'adéquation de deux modèles différents à un même échantillon de données, lorsque la longueur N 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 $1/\sqrt{N}$. Des résultats du type théorème-limite central montrent que la statistique de test permettant de décider entre ces modèles est asymptotiquement gaussienne, avec une moyenne différente selon que l'échantillon de données provient de l'un ou l'autre modèle.

Maintenance conditionnelle Au lieu d'une inspection systématique, il s'agit d'effectuer une surveillance continue de l'installation considérée (machine, structure, procédé, etc.) à partir de données recueillies à la sortie des capteurs, de façon à prévenir l'apparition d'un dysfonctionnement ou d'un endommagement avant qu'il ait pu avoir des conséquences trop graves.

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.

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 de façon précoce 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 par un changement éventuel 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 et adaptée [?, ?], permet de*

[Rou72] G. 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.

fonder une telle démarche [?, ?].

Cette activité se situe dans le prolongement de l'activité ancienne dans l'équipe en détection de changements. La contribution majeure est le développement d'une démarche générale et originale, reposant sur l'approche asymptotique locale en statistique. Cette démarche se trouve confortée par l'intérêt croissant porté dans un grand nombre d'applications industrielles, à la maintenance conditionnelle. L'approche proposée consiste à détecter de façon précoce des petites déviations par rapport au comportement sain du système, en conditions de travail usuelles, c'est-à-dire sans introduire d'excitation artificielle, sans ralentissement ni arrêt de l'installation. Le principe est de construire un «résidu», idéalement nul en fonctionnement nominal, peu sensible aux bruits et aux perturbations, et très sensible aux pannes.

On suppose donné un modèle paramétrique $\{\mathbb{P}_\theta, \theta \in \Theta\}$ décrivant le système à surveiller, où la loi des observations est caractérisée par le paramètre $\theta \in \Theta$, et où le comportement sain correspond à la valeur θ_0 du paramètre : cette valeur peut représenter un comportement «type» normalisé pour le système considéré, ou bien être obtenue à l'issue d'une étape préliminaire d'identification utilisant des données de référence, par exemple

$$\theta_0 = \arg\{\theta \in \Theta : U_N(\theta) = 0\},$$

où la «fonction d'estimation»

$$U_N(\theta) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^N H(\theta, Z_n),$$

est telle que $\mathbb{E}_\theta[U_N(\theta)] = 0$ pour tout $\theta \in \Theta$. Etant donnée une nouvelle suite de données recueillies en continu à la sortie des capteurs, on se pose les questions suivantes :

- le nouvel échantillon correspond-il toujours à \mathbb{P}_{θ_0} ? (il s'agit de savoir si l'échantillon observé est bien en conformité avec le modèle nominal),
- sinon, quelles sont les composantes du paramètre θ qui sont responsables de ce changement ? (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.

Détection L'approche asymptotique locale permet de réduire de façon générique le problème de validation de modèle formulé pour un «système dynamique», en un problème universel et «statique» de détection dans la moyenne d'un «vecteur» aléatoire gaussien. Etant donné un échantillon de longueur N , on introduit une hypothèse alternative proche de l'hypothèse nominale, et pour décider entre $\theta = \theta_0$ et $\theta = \theta_0 + \Delta/\sqrt{N}$, où Δ est un changement inconnu mais fixe, on génère un «résidu» de la forme

$$\zeta_N = \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{n=0}^N H(\theta_0, Z_n) = \sqrt{N} U_N(\theta_0).$$

On suppose que $\mathbb{E}_\theta[U_N(\theta_0)] = 0$ si et seulement si $\theta = \theta_0$ (avec θ_0 fixé). Si la matrice $M_N = -\mathbb{E}_{\theta_0}[U'_N(\theta_0)]$, qui est aussi la dérivée au point θ_0 de l'application $\theta \mapsto \mathbb{E}_\theta[U_N(\theta_0)]$, converge vers

une limite M , alors le théorème–limite central montre ^[DJB97] que le résidu est asymptotiquement gaussien

$$\zeta_N \implies \begin{cases} \mathcal{N}(0, \Sigma) & \text{sous } \mathbb{P}_{\theta_0}, \\ \mathcal{N}(M \Delta, \Sigma) & \text{sous } \mathbb{P}_{\theta_0 + \Delta/\sqrt{N}}, \end{cases}$$

où la matrice de covariance asymptotique Σ peut être évaluée ou estimée [?]. Décider entre $\Delta = 0$ et $\Delta \neq 0$ dans le modèle «limite» se traduit par le test du χ^2 suivant (en supposant que M est de rang plein et Σ inversible)

$$t = \bar{\zeta}^T \mathcal{I}^{-1} \bar{\zeta} \geq \lambda.$$

où $\bar{\zeta} = M^T \Sigma^{-1} \zeta_N$ et $\mathcal{I} = M^T \Sigma^{-1} M$.

Cette approche permet de décider (avec un niveau d'erreur quantifiable) si une valeur du résidu est significativement non–nulle pour qu'on puisse déclarer qu'une panne a eu lieu. Il est important de remarquer qu'aussi bien le résidu que les matrices de sensibilité M et de covariance Σ sont évalués (ou estimés) pour le modèle nominal, c'est-à-dire pour la vraie valeur du paramètre. En particulier, il n'est pas nécessaire de ré-identifier le modèle, et le calcul des matrices de sensibilité et de covariance peut être effectué à l'avance.

Diagnostic En supposant pour simplifier que la question «quel type de panne a eu lieu» puisse se réduire à la question «quelle composante du vecteur θ a changé», le problème de diagnostic peut alors être résolu par des techniques standard d'élimination de paramètres de nuisance. On partitionne le vecteur de panne Δ , ce qui induit un partitionnement de la matrice de sensibilité M , de la matrice d'information de Fisher $\mathcal{I} = M^T \Sigma^{-1} M$, et du résidu normalisé $\bar{\zeta} = M^T \Sigma^{-1} \zeta_N$

$$\Delta = \begin{pmatrix} \Delta_a \\ \Delta_b \end{pmatrix}, \quad \mathcal{I} = \begin{pmatrix} \mathcal{I}_{aa} & \mathcal{I}_{ab} \\ \mathcal{I}_{ba} & \mathcal{I}_{bb} \end{pmatrix}, \quad M = \begin{pmatrix} M_a & M_b \end{pmatrix}, \quad \bar{\zeta} = \begin{pmatrix} \bar{\zeta}_a \\ \bar{\zeta}_b \end{pmatrix}.$$

On peut adopter une approche par «sensibilité», pour décider entre $\Delta_a = \Delta_b = 0$ et $\Delta_a \neq 0, \Delta_b = 0$ dans le modèle «limite», et on obtient la statistique de test suivante

$$t_a = \bar{\zeta}_a^T \mathcal{I}_{aa}^{-1} \bar{\zeta}_a,$$

où $\bar{\zeta}_a$ est le résidu «partiel». Si $t_a \geq t_b$, on décidera que la panne est causée par la composante a plutôt que par la composante b . Alternativement, on peut adopter une approche «minimax», pour décider entre $\Delta_a = 0$ et $\Delta_a \neq 0$, dans le modèle «limite», avec Δ_b inconnu, et on obtient la statistique de test suivante

$$t_a^* = \bar{\zeta}_a^{*T} \mathcal{I}_a^{*-1} \bar{\zeta}_a^*,$$

où $\bar{\zeta}_a^* = \bar{\zeta}_a - \mathcal{I}_{ab} \mathcal{I}_{bb}^{-1} \bar{\zeta}_b$ est le résidu «effectif», résultant de la régression du résidu partiel $\bar{\zeta}_a$ sur le résidu de nuisance $\bar{\zeta}_b$, et le complément de Schur $\mathcal{I}_a^* = \mathcal{I}_{aa} - \mathcal{I}_{ab} \mathcal{I}_{bb}^{-1} \mathcal{I}_{ba}$ est la matrice d'information de Fisher associée. Si $t_a^* \geq t_b^*$, on décidera que la panne est causée par la composante a plutôt que par la composante b .

[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>.

Diagnostic physique Cette approche permet également de réaliser un diagnostic physique, c'est-à-dire en termes d'un paramètre ϕ ayant une signification physique (plutôt qu'en termes du paramètre θ utilisé pour l'identification et la surveillance, et provenant éventuellement d'une modélisation boîte noire), et ceci sans résoudre le problème inverse. Il suffit pour cela de constater que la matrice de sensibilité par rapport au paramètre physique s'écrit $M \mathcal{J}$, où \mathcal{J} désigne la matrice jacobienne au point ϕ_0 de l'application $\phi \mapsto \theta(\phi)$, et de mettre en œuvre la procédure de diagnostic sur les composantes du paramètre ϕ .

La démarche systématique présentée ci-dessus fournit un cadre général pour la surveillance et le diagnostic des installations industrielles continues. La question cruciale qui reste à traiter dans chaque classe de modèles, est le choix du résidu, ou de façon équivalente le choix de la fonction d'estimation. Les activités actuelles de l'équipe concernent deux grandes classes de modèles :

- les systèmes dynamiques non-linéaires, voir module 6.1,
- les systèmes linéaires décrivant des structures mécaniques en vibrations, voir module 6.2.

3.2 Inférence statistique des modèles de Markov cachés, et filtrage particulaire

Mots clés : HMM, statistique asymptotique, stabilité exponentielle, filtrage particulaire.

Glossaire :

HMM Modèle de Markov caché, en anglais «hidden Markov model» : automate stochastique (ou chaîne de Markov) dont l'état interne n'est pas observé directement, et doit être estimé à partir d'observations bruitées. Plus généralement, il s'agit aussi d'inférer le modèle lui-même. Modèles très utilisés en reconnaissance de la parole, pour l'alignement des séquences biologiques, et plus récemment dans le diagnostic de systèmes dynamiques distribués à événements discrets, voir module 3.3.

Filtrage particulaire Méthode numérique permettant d'approcher la distribution de probabilité conditionnelle de l'état caché 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 en fonction de leur cohérence (quantifiée par la fonction de vraisemblance) avec les observations.

Résumé : *L'inférence statistique des modèles de Markov cachés repose sur l'étude du comportement asymptotique du filtre de prédiction (c'est-à-dire la distribution de probabilité de l'état caché sachant les observations aux instants précédents) ou de sa dérivée par rapport au paramètre. Nous avons étudié deux types d'asymptotiques : (i) l'asymptotique en temps long, où nous avons proposé une approche systématique, reposant sur la propriété de stabilité exponentielle du filtre, et (ii) l'asymptotique des «petits bruits», où il est facile d'obtenir des résultats explicites intéressants, dans un langage proche de celui de l'automatique déterministe non-linéaire.*

Nous avons également proposé des méthodes numériques de type Monte Carlo, très faciles à mettre en œuvre et connues sous le terme générique de filtres particulières, pour le calcul approché du filtre, du filtre linéarisé tangent, et d'autres filtres associés au calcul récursif de fonctionnelles additives de l'état caché (comme dans l'algorithme EM).

Les modèles de Markov cachés, en anglais «hidden Markov models» (HMM), sont un cas particulier de systèmes dynamiques stochastiques partiellement observés, où l'état d'un processus de Markov

(à temps discret ou continu, à espace d'état fini ou général) doit être estimé à partir d'observations bruitées. Ces modèles sont très flexibles, du fait de l'introduction de variables latentes (non-observées) qui permettent de modéliser des structures de dépendances temporelles complexes, de prendre en compte des contraintes, etc. En outre, la structure markovienne sous-jacente permet d'utiliser des procédures numériques intensives (filtrage particulière, méthodes de Monte Carlo par chaîne de Markov (MCMC), etc.) mais dont la complexité est très réduite. Les HMM sont largement utilisés dans des domaines applicatifs variés, comme la reconnaissance de la parole, l'alignement de séquences biologiques, la poursuite en environnement complexe, la modélisation et le contrôle des réseaux, les communications numériques, etc.

Au-delà de l'estimation récursive de l'état caché à partir d'une suite d'observations, le problème se pose de l'inférence statistique des HMM à espace d'état général, incluant l'estimation des paramètres du modèle, la surveillance et le diagnostic précoce de petits changements dans les paramètres du modèle, voir module 3.1, etc.

Asymptotique en temps long La contribution majeure est l'étude asymptotique quand la durée d'observation tend vers l'infini d'une chaîne de Markov étendue, dont l'état inclut (i) l'état caché, (ii) l'observation, (iii) le filtre de prédiction (c'est-à-dire la distribution de probabilité conditionnelle de l'état caché sachant les observations aux instants précédents), et éventuellement (iv) la dérivée du filtre de prédiction par rapport au paramètre. Il est en effet facile d'exprimer la fonction de log-vraisemblance, le critère des moindres carrés conditionnels, et d'autres processus de contraste classiques, ainsi que leurs dérivées par rapport au paramètre, comme des fonctionnelles additives de la chaîne de Markov étendue.

La démarche générale proposée est la suivante :

- on établit d'abord la stabilité exponentielle (c'est-à-dire une propriété d'oubli exponentiel de la condition initiale) du filtre de prédiction et de sa dérivée, pour un modèle mal-spécifié,
- on en déduit ensuite une propriété d'ergodicité géométrique et l'existence d'une unique mesure invariante pour la chaîne de Markov étendue, d'où une loi des grands nombres et un théorème-limite central pour une grande classe de processus de contraste et leurs dérivées, et une propriété de normalité asymptotique locale,
- on obtient alors de façon classique la consistance (c'est-à-dire la convergence vers l'ensemble des minima de la fonction de contraste associée), et la normalité asymptotique d'une grande classe d'estimateurs de minimum de contraste.

Ce programme a été mené à terme dans le cas où l'espace d'état est fini [?, ?], et a été généralisé dans [DM01] sous une hypothèse de minoration uniforme du noyau de transition, qui n'est typiquement vérifiée que si l'espace d'état est compact.

Comme on le voit, toute la démarche repose sur la propriété de stabilité exponentielle du filtre optimal, et la principale difficulté qui subsiste actuellement consiste à s'affranchir de l'hypothèse de minoration uniforme du noyau de transition [DG01, LO01], de façon à pouvoir considérer des situations générales où l'espace d'état est non-compact.

[DM01] R. DOUC, C. MATIAS, « Asymptotics of the maximum likelihood estimator for general hidden Markov models », *Bernoulli* 7, 3, juin 2001, p. 381–420.

[DG01] P. DEL MORAL, A. GUIONNET, « On the stability of interacting processes with applications to filtering and genetic algorithms », *Annales de l'Institut Henri Poincaré, Probabilités et Statistiques* 37, 2, 2001, p. 155–194.

[LO01] F. LE GLAND, N. OUDJANE, « Stability and uniform approximation of nonlinear filters using the Hilbert

Asymptotique des «petits bruits» Un autre type d'approche asymptotique peut également être utilisé, où il est relativement facile d'obtenir des résultats explicites intéressants, dans un langage proche de celui de l'automatique déterministe non-linéaire [Kut94].

Pour prendre l'exemple simple où l'état caché vérifie une équation différentielle stochastique, ou bien un modèle d'état non-linéaire, et les observations sont noyées dans un bruit blanc gaussien additif, l'approche consiste à imaginer que les covariances des bruits d'état et d'observation tendent simultanément vers zéro. S'il est naturel dans beaucoup d'applications de considérer que les covariances des bruits sont petites, cette approche asymptotique est moins naturelle que l'asymptotique en temps long, où il suffit (sous réserve d'une propriété d'ergodicité) d'accumuler les observations pour voir apparaître les phénomènes limites (loi des grands nombres, théorème-limite central, etc.) attendus. En revanche, les quantités obtenues (divergence de Kullback-Leibler, matrice d'information de Fisher, covariance asymptotique, etc.) prennent ici des formes beaucoup plus explicites que dans l'asymptotique en temps long.

Les résultats suivants ont été obtenus au cours des dernières années avec cette approche :

- la consistance de l'estimateur du maximum de vraisemblance, (c'est-à-dire la convergence vers l'ensemble M des minima de la divergence de Kullback-Leibler), a été obtenue par des techniques de grandes déviations, avec une approche analytique [JL95],
- si cet ensemble M ne se réduit pas à la vraie valeur du paramètre, c'est-à-dire si le modèle n'est pas identifiable, on peut néanmoins préciser le comportement asymptotique des estimateurs : dans le cas simple où l'équation d'état est une équation différentielle ordinaire (non-bruitée), nous avons montré [10] dans un cadre bayésien que (i) si la matrice d'information de Fisher \mathcal{I} est de rang constant r dans un voisinage de l'ensemble M , alors cet ensemble est une variété différentielle de codimension r , (ii) la distribution de probabilité a posteriori du paramètre converge vers une distribution de probabilité limite aléatoire, portée par la variété M , absolument continue par rapport à la mesure de Lebesgue sur M , avec une expression explicite pour la densité, et (iii) la distribution de probabilité a posteriori de l'écart convenablement normalisé entre le paramètre et sa projection sur la variété M converge vers un mélange de distributions de probabilités gaussiennes sur les espaces normaux à la variété M , ce qui généralise la propriété de normalité asymptotique habituelle,
- plus récemment, nous avons montré que (i) la famille paramétrée des distributions de probabilités des observations vérifie la propriété de normalité asymptotique locale [Le 86], d'où on déduit la normalité asymptotique de l'estimateur du maximum de vraisemblance, avec une expression explicite de la matrice de covariance asymptotique, c'est-à-dire de la matrice d'information de Fisher \mathcal{I} , en termes du filtre de Kalman associé au modèle linéaire gaussien tangent, et (ii) la fonction score (c'est-à-dire la dérivée de la fonction de log-vraisemblance par rapport au paramètre), évaluée pour la vraie valeur du paramètre et convenablement normalisée, converge vers

metric, and application to particle filters », *Publication Interne n°1404*, IRISA, juin 2001, <ftp://ftp.irisa.fr/techreports/2001/PI-1404.ps.gz>.

[Kut94] Y. A. KUTOYANTS, *Identification of Dynamical Systems with Small Noise, Mathematics and its Applications*, 300, Kluwer Academic Publisher, Dordrecht, 1994.

[JL95] M. R. JAMES, F. LE GLAND, « Consistent parameter estimation for partially observed diffusions with small noise », *Applied Mathematics & Optimization* 32, 1, juillet/août 1995, p. 47–72.

[Le 86] L. LE CAM, *Asymptotic Methods in Statistical Decision Theory, Springer Series in Statistics*, Springer-Verlag, New York, 1986.

une v.a. gaussienne centrée, de matrice de covariance \mathcal{I} .

Filtrage particulaire L'étude des HMM à état général soulève immédiatement la question du calcul, fût-il seulement approché, du filtre optimal et de quantités connexes, comme par exemple la dérivée du filtre optimal par rapport à un paramètre inconnu du modèle (plus généralement, le filtre optimal linéarisé tangent), ou bien d'autres filtres ^[CL89] associés au calcul récursif d'espérances conditionnelles par rapport aux observations de fonctionnelles additives (FA) de l'état caché (un exemple d'une telle FA est la fonction auxiliaire dans l'algorithme EM).

Une réponse attractive et prometteuse a été proposée sous le terme générique de filtrage particulaire, et fait l'objet de recherches très actives, tant dans le domaine de la mise en œuvre pratique, que dans celui de l'extension à des modèles et des problèmes plus généraux. Les principaux résultats mathématiques sont présentés dans l'article de synthèse ^[DM00], et de nombreux aspects théoriques et pratiques sont abordés dans l'ouvrage collectif ^[DdG01].

Dans sa version la plus simple, la méthode consiste à approcher le filtre optimal à l'aide de la distribution de probabilité empirique d'un système de particules. Entre deux instants d'observation, les particules se déplacent de façon indépendante selon la dynamique de l'état caché, et sitôt qu'une nouvelle observation est disponible, un rééchantillonnage a lieu, où les particules sont choisies en fonction de leur adéquation à la nouvelle observation (quantifiée par la fonction de vraisemblance). Sous l'effet du rééchantillonnage, qui constitue l'étape essentielle de la méthode ^[GSS93], les particules se concentrent automatiquement dans les régions d'intérêt de l'espace d'état. La méthode est très facile à mettre en œuvre, puisqu'il suffit de simuler de façon indépendante des trajectoires de l'état caché, l'interaction ayant lieu uniquement lors du rééchantillonnage. Il est également possible d'utiliser les méthodes particulières pour résoudre divers problèmes statistiques pour les HMM à état général, incluant l'estimation récursive des paramètres du modèle, la surveillance et diagnostic précoce de petits changements dans les paramètres du modèle, etc. Dans ces deux problèmes, il est nécessaire de calculer aussi le filtre optimal linéarisé tangent, en plus du filtre optimal lui-même.

Pour étudier l'erreur d'approximation des algorithmes ainsi obtenus quand le nombre de particules tend vers l'infini, la première étape consiste, comme dans l'approximation particulaire du filtre optimal ^[LO01], à établir que l'erreur globale résulte de la propagation d'erreurs locales par les équations du filtre dérivé. Pourvu que ces équations vérifient une propriété de stabilité exponentielle, on peut alors obtenir des estimations d'erreur uniformes en temps. L'étude des propriétés de contraction pour

-
- [CL89] F. CAMPILLO, F. LE GLAND, « MLE for partially observed diffusions : direct maximization vs. the EM algorithm », *Stochastic Processes and their Applications* 33, 2, 1989, p. 245–274.
- [DM00] P. DEL MORAL, L. MICLO, « Branching and interacting particle systems approximations of Feynman–Kac formulae with applications to nonlinear filtering », in : *Séminaire de Probabilités XXXIV*, J. Azéma, M. Émery, M. Ledoux, et M. Yor (éditeurs), *Lecture Notes in Mathematics*, 1729, Springer–Verlag, Berlin, 2000, p. 1–145.
- [DdG01] A. DOUCET, N. DE FREITAS, N. GORDON (éditeurs), *Sequential Monte Carlo Methods in Practice, Statistics for Engineering and Information Science*, Springer–Verlag, New York, 2001.
- [GSS93] N. J. GORDON, D. J. SALMOND, A. F. M. SMITH, « Novel approach to nonlinear / non–Gaussian Bayesian state estimation », *IEE Proceedings, Part F* 140, 2, avril 1993, p. 107–113.
- [LO01] F. LE GLAND, N. OUDJANE, « Stability and uniform approximation of nonlinear filters using the Hilbert metric, and application to particle filters », *Publication Interne n°1404*, IRISA, juin 2001, <ftp://ftp.irisa.fr/techreports/2001/PI-1404.ps.gz>.

le filtre optimal et les filtres dérivés a déjà été évoquée plus haut comme la principale difficulté qui subsiste actuellement.

3.3 Modèles partiellement stochastiques pour la surveillance des systèmes distribués

Mots clés : système distribué, système à événements discrets, concurrence, réseau de Petri, dépliage, réseau d'automates, modèle partiellement stochastique, HMM, Markov nets, algorithme réparti.

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 voir module 3.2.

Concurrence Dans un système à événements discrets, deux événements sont dits concurrents s'ils peuvent survenir dans n'importe quel ordre, ou même simultanément, sans changer le comportement ultérieur du système.

Résumé : *Ce thème d'étude est en grande partie mené conjointement avec le projet TRISKELL (Claude Jard), avec comme application cible la supervision des réseaux de télécommunications, et notamment le diagnostic de panne. Pour cela, nous avons entrepris d'étendre les techniques dites de HMM aux systèmes distribués. Ces systèmes sont modélisés sous forme de réseaux d'automates stochastiques (extension des réseaux de Petri saufs), munis d'une dynamique 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 [ERV96,ER99] d'un RdP ou d'un produit d'automates, 2) créer une nouvelle notion de système «partiellement stochastique» adaptée à la sémantique en ordres partiels et aux techniques de dépliage, 3) adapter l'algorithme de Viterbi, calculant la trajectoire d'état de vraisemblance maximale d'un HMM, à une notion de temps partiellement ordonné.

Un résultat important dans ce domaine réside dans la possibilité de «distribuer» l'algorithme de diagnostic, ou d'observation d'état, afin de ne plus manipuler que des états locaux du système surveillé, lequel peut être de taille importante. Ce résultat se fonde sur un parallèle étroit entre les champs de Markov (ou réseaux de variables aléatoires) et les systèmes distribués, vus comme des réseaux de systèmes dynamiques. Les algorithmes d'inférence développés pour les premiers se transportent naturellement vers ces derniers, ce qui fournit toute une panoplie de méthodes pour manipuler des systèmes dynamiques complexes.

[ERV96] J. ESPARZA, S. RÖMER, W. VOGLER, « An improvement of McMillan's unfolding algorithm », in : *TACAS'96 : Tools and Algorithms for the Construction and Analysis of Systems*, T. Margaria et B. Steffen (éditeurs), *Lecture Notes in Computer Science*, 1055, Springer-Verlag, Berlin, 1996, p. 87-106.

[ER99] J. ESPARZA, S. RÖMER, « An unfolding algorithm for synchronous products of transition systems », in : *CONCUR'99 : Concurrency Theory*, J. C. M. Baeten et S. Mauw (éditeurs), *Lecture Notes in Computer Science*, 1664, Springer-Verlag, Berlin, 1999, p. 2-20.

Les efforts actuels visent 1) à enrichir le cadre stochastique, afin de pouvoir identifier les probabilités de transition des composants élémentaires, et 2) à robustifier l'algorithme de supervision, notamment en cas de connaissance incomplète du système surveillé.

Système distribué Les systèmes distribués que nous considérons se rangent dans la catégorie des systèmes dynamiques à événements discrets, ou encore des machines à états finis. Le caractère «distribué» souligne une structure particulière de tels systèmes : ils s'obtiennent par connexion de sous-systèmes élémentaires. Un exemple typique est celui des réseaux de Petri (RdP) : deux RdP peuvent être connectés très simplement par mise en commun de certaines places, qui deviennent ainsi «partagées». Les jetons de ces places peuvent alors circuler d'un réseau à l'autre, ce qui permet de modéliser des interactions comme l'exclusion mutuelle, la transmission de ressource, etc. De façon générale, un système distribué peut se voir comme un réseau d'automates élémentaires, définis chacun sur un ensemble de variables d'état. La connexion se fait par mise en commun de variables (celles-ci jouent le rôle des places dans les RdP). Le diagramme de connexion des différents sous-systèmes définit ainsi un réseau d'interaction.

La modélisation d'un système complexe peut être grandement simplifiée par une approche modulaire. L'intérêt des systèmes distribués est ailleurs cependant : en isolant les points d'interaction entre sous-systèmes, on met aussi en évidence des zones de comportements concurrents. En d'autres termes, tant que deux sous-systèmes n'interagissent pas par le biais de variables partagées, leurs évolutions sont indépendantes. Cette tautologie mérite d'être signalée : elle indique des «zones de concurrence» entre sous-systèmes, dans lesquelles les évolutions peuvent obéir à des horloges indépendantes, sans conséquence sur le comportement du système global. Cela signifie que les événements d'un système distribué ne sont que partiellement ordonnés dans le temps, i.e. qu'une notion de temps global n'est pas pertinente. Les trajectoires de systèmes distribués se décrivent ainsi dans une sémantique dite «d'ordre partiel», ou «de concurrence vraie», qui manipule des ordres partiels d'événements au lieu de séquences d'événements. La taille de l'espace des trajectoires s'en trouve considérablement réduite. Dans la sémantique de concurrence vraie, l'espace des trajectoires se représente à l'aide du «dépliage» du système, au lieu du graphe des marquages.

Cadre stochastique Si l'on s'en tient aux réseaux de Petri (RdP), 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 une dynamique du RdP décrite sous forme de chaîne de Markov, ce qui est le cas pour les notions habituelles de RdP stochastique. Parler de chaîne de Markov suppose en effet une notion de temps global rythmant les événements ; il s'ensuit que la vraisemblance de deux événements concurrents dépend de l'ordre dans lequel ils apparaissent. En revanche, le bon cadre est celui des champs Markoviens avec contraintes, qui correspond au modèle dit CSS [?].

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 «concurrency» et «indépendance stochastique» pour un ensemble de transitions. En particulier, la dynamique de ces RdP n'est pas décrite par une chaîne de Markov, d'où le nom de RdP «partiellement stochastiques».

Ces idées se généralisent sans difficulté à un réseau d'automates stochastiques. Il suffit de considérer l'espace produit formé des trajectoires de chaque automate. Les trajectoires de sous-systèmes différents sont vues comme indépendantes, et l'on munit donc l'espace produit de la loi produit. On conditionne ensuite cet espace par la contrainte de cohérence des tuples de trajectoires pour la circulation des ressources partagées. On obtient, comme pour les RdP, un automate produit «partiellement stochastique».

Algorithmique répartie de reconstruction d'état On dispose donc d'une notion de système (partiellement) stochastique pour laquelle nous voulons généraliser les techniques HMM. En supposant que les transitions du système produisent des événements observables, il s'agit de retrouver la trajectoire du système la plus vraisemblable expliquant les observations, cette trajectoire étant vue comme un ordre partiel d'événements. Nous avons montré qu'il suffit de considérer des «pièces» constituées d'une transition et des variables (ou places) qui lui sont reliées, et d'associer à chaque pièce prise isolément une «vraisemblance» issue de notre modèle stochastique, vraisemblance conditionnée par les observations. Les trajectoires du système peuvent ainsi se voir comme des puzzles formés de ces pièces, et leurs vraisemblances s'obtiennent par produit des vraisemblances des pièces utilisées. Le décodage au maximum de vraisemblance revient alors à construire récursivement les meilleurs puzzles, à la manière d'une programmation dynamique [?].

Ce schéma est opérationnel lorsque les observations de tout le système sont rassemblées en un seul endroit, appelé «superviseur». Cette situation n'est pas la plus pertinente en pratique : une structure répartie d'observation semble plus naturelle pour un système distribué. Nous avons montré qu'il est inutile de rassembler les observations, et qu'une algorithmique HMM répartie est beaucoup plus judicieuse. Celle-ci se compose de plusieurs agents ; chacun traite les observations issues du sous-système qu'il surveille à l'aide des pièces locales à ce sous-système. On reconstruit ainsi une partie du puzzle global. Les communications entre agents ne concernent que les pièces touchant à des ressources partagées. On obtient ainsi une véritable reconstruction parallèle et asynchrone du puzzle global, manipulant uniquement des états locaux, et exploitant au mieux le réseau d'interaction et la concurrence entre sous-systèmes. Cette algorithmique est en cours de prototypage, en vue de développer un superviseur distribué pour une maquette de réseau SDH, voir le projet Magda, module 7.6.

4 Domaines d'applications

Les domaines qui ont donné ou donnent lieu à des applications avec partenaire industriel et données réelles à traiter, sont divers : la mécanique des vibrations, l'électronique embarquée pour l'industrie automobile, le diagnostic dans les réseaux de télécommunications, le contrôle d'accès dans les communications mobiles, la reconnaissance de la parole, le traitement d'antenne, l'énergie, la géophysique, et la robotique sous-marine. 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, dont l'augmentation résulte d'un choix du projet.

4.1 Analyse de structures vibrantes en ambiance de travail

Voir modules 3.1, 6.2 et 7.1.

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

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 Désigne génériquement un algorithme pour l'identification des systèmes linéaires à partir d'une suite de matrices de covariance de la sortie, dans lequel un rôle essentiel est joué par différents sous-espaces de vecteurs aléatoires gaussiens [vD96].

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» : 1) analyse modale, 2) corrélation entre mesures et modèle, 3) détection et diagnostic de fatigues. Le fait, pour ces méthodes, d'opérer en ambiance de travail, impose les contraintes suivantes : 1) l'excitation est naturelle, résultant des conditions mêmes de fonctionnement de la structure, elle est souvent non stationnaire, 2) 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, avions) ou les machines (turbo-alternateurs, systèmes d'engrenage). Des outils de détection et de 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 de structures mécaniques et de 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 Eurêka 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 de la machine considérée, sans excitation artificielle, ni ralentissement, ni arrêt de machine. Les projets SIGMA2 et METALAU de l'INRIA à Rocquencourt 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 traite avec les logiciels développés dans SINOPSYS, figurent les données des vols d'essai d'Ariane 5.

[vD96] P. VAN OVERSCHEE, B. DE MOOR, *Subspace Identification for Linear Systems*, Kluwer Academic Publishers, Boston, 1996.

Dans la première étape du projet SINOPSYS, focalisée sur l'analyse modale et l'identification des modes de vibration, nous avons amélioré nos procédures interactives de sélection et de validation de modes, et développé un module de «validation de modèle», permettant une validation croisée du résultat d'une identification sur un jeu de données de validation. Dans une seconde étape, nous avons développé 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 des données de laboratoire avec excitation mesurée, que sur des données en fonctionnement sans mesure de l'excitation. L'ensemble des fonctionnalités de ces deux étapes est intégré dans l'outil CADA_X de LMS d'une part, et dans une boîte à outils pour le «freeware» Scilab d'autre part. La dernière étape a porté 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 nouvelle coopération, toujours dans le cadre d'Eurêka, vient de démarrer dans le domaine de l'aéronautique, portant sur l'utilisation des données de vol sous excitation naturelle pour les essais en vol, voir module 7.1.

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 : diagnostic de pannes en gestion de réseaux, turbo-codes, décodage conjoint source-canal

Voir modules 3.3, 6.5, 6.6, 7.6 et 7.8.

Mots clés : réseau de télécommunication, gestion de réseau, supervision, corrélation d'alarmes, diagnostic, turbo-code, décodage conjoint source-canal.

Glossaire :

Gestion de réseau Désigne la couche haute de gestion d'un réseau de télécommunications, c'est-à-dire les opérations de supervision : surveillance, maintenance, etc.

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 3.2.

Turbo-code Codes correcteurs d'erreurs introduits par Berrou, Glavieux et Thitimajshima ^[BGT93], alliant deux codes convolutifs via un entrelaceur. Le nom provient de l'algorithme itératif de décodage, manipulant une information «soft», de nature probabiliste.

Un investissement important, 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 l'algorithmique de suivi de comportement, et en particulier de diagnostic. Cette technique permet d'envisager une mise à jour plus aisée des logiciels de diagnostic lorsque le réseau évolue. L'originalité de cette approche est que nous cherchons d'emblée une modélisation

[BGT93] C. BERROU, A. GLAVIEUX, P. THITIMAJSHIMA, « Near Shannon limit error-correcting coding and decoding : turbo codes », in : *Proceedings of the IEEE International Conference on Communications, Geneva 1993*, 2, IEEE-CS, p. 1064-1070, mai 1993.

modulaire du réseau, dans le but de distribuer l'algorithmique de diagnostic. Ce travail se fait en collaboration avec le projet TRISKELL, et forme le cœur du projet RNRT exploratoire MAGDA2, voir module 7.6.

Avec un point de vue plus proche de la couche physique, nous avons commencé à nous intéresser à la surveillance, et à terme au diagnostic, d'une ligne de transmission de données binaires par fibre optique, voir module 7.8. Il s'agit en quelque sorte d'un retour aux méthodes analogiques, pour assurer la transparence, mais avec des contraintes de très haut débit.

Par ailleurs, nous nous intéressons également aux turbo-codes et à leurs extensions, en raison du lien récemment établi [MMC98] 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.

Les techniques turbo ont par ailleurs été mises à contribution dans un problème de décodage conjoint source-canal, en collaboration avec le projet TEMICS. Il s'agit d'exploiter au mieux toute l'information a priori contenue dans une chaîne de transmission comportant une source markovienne, un codeur de source (de type Huffman) utilisant un code de longueur variable, et enfin un code correcteur d'erreur. Ces trois éléments sont habituellement utilisés indépendamment (dans l'ordre inverse) lors de la réception. Nous avons montré que des gains de performance significatifs peuvent être obtenus par des méthodes itératives, utilisant alternativement les trois modèles. Le travail autour des techniques turbo se prolonge dans plusieurs directions : le codage/décodage par descriptions multiples (et son lien avec les codes espace-temps), la quantification en treillis (où il est envisagé d'utiliser un treillis de type turbo-code, en lieu et place d'un code convolutif), la turbo-égalisation et le problème de la récupération de porteuse.

5 Logiciels

5.1 Nonlinear Modelling Matlab Toolbox

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

Résumé : *En coopération avec Lennart Ljung, de l'université de Linköping, et Anatoli Juditsky, de l'université Joseph Fourier à Grenoble, nous développons 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, avec notamment les réseaux d'ondelettes et les réseaux de neurones. Les modèles proposés sont, pour l'essentiel, de type régression ou auto-régression non-linéaire (NARX), avec quelques extensions spécifiques pour lesquelles on dispose de bons algorithmes.*

[MMC98] R. J. McELIECE, D. J. C. MacKAY, J.-F. CHENG, « Turbo decoding as an instance of Pearl's belief propagation algorithm », *IEEE Journal on Selected Areas in Communications SAC-16*, 2, février 1998, p. 140-152.

Participant : Qinghua Zhang [correspondant].

Sur la base d'un travail conduit en coopération avec l'université de Linköping ^[JHB⁺95,SZL⁺95], nous réalisons 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 sont 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 (linéaire suivi d'une non-linéarité statique), et 4) Hammerstein (linéaire précédé 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 significative, et 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 ^[JHB⁺95,SZL⁺95]. Ces méthodes sont en outre complétées par des techniques de rétropropagation, étendues à certaines catégories de modèles.

La programmation de la boîte à outils exploite largement les fonctionnalités de Matlab en matière de programmation objet. Les noyaux algorithmiques de la boîte à outils sont déjà réalisés. Les travaux de développement en cours portent essentiellement sur l'interface utilisateur et la mise en conformité de la programmation objet avec les préconisations de The Mathworks.

5.2 Modal Analysis and Health Monitoring Scilab Toolbox

Mots clés : identification, identification sous-espace, identification sortie seule, identification entré-sortie, fusion de capteurs, surveillance vibratoire, détection d'endommagements, diagnostic modal, localisation d'endommagements, positionnement optimal de capteurs, Scilab.

Résumé : *En collaboration avec Maurice Goursat (projet METALAU), nous avons réalisé une boîte-à-outils Scilab dédiée à l'analyse modale et la surveillance vibratoire de structures ou de machines sous excitation connue ou ambiante (inconnue).*

Participants : Laurent Mevel [correspondant], Yann Veillard.

En collaboration avec Maurice Goursat (projet METALAU de l'INRIA à Rocquencourt), nous avons réalisé une version entièrement refondue de la boîte-à-outils Scilab ^[GBBM00], [37] dédiée à l'analyse modale et la surveillance vibratoire de structures ou de machines sous excitation connue ou ambiante (inconnue).

Cette boîte-à-outils possède les fonctionnalités suivantes :

-
- [JHB⁺95] 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.
- [SZL⁺95] J. SJÖBERG, Q. ZHANG, L. LJUNG, A. BENVENISTE, B. DELYON, P.-Y. GLORENNAC, H. HJALMÄRSSON, A. JUDITSKY, « Non-linear black-box modelling in system identification : a unified overview », *Automatica* 31, 12, décembre 1995, p. 1691-1724.
- [GBBM00] M. GOURSAT, M. BASSEVILLE, A. BENVENISTE, L. MEVEL, « A Scilab toolbox for output only modal analysis and diagnosis », in : *18th International Modal Analysis Conference (IMAC-XVIII)*, San Antonio, SEM, Inc., février 2000.

- Identification sous-espace sorties seules, voir modules 6.2 et 7.1. Il s’agit de l’identification de la structure propre (valeurs propres et partie observée des vecteurs propres associés) de la matrice de transition d’état d’un système dynamique linéaire, au vu de la seule observation d’un certain nombre de ses sorties résumées par les matrices de covariances correspondant à des décalages temporels successifs. Pour cette méthode, voir les articles [MHv99,BBG⁺01].
- Identification sous-espace entrées-sorties, voir modules 6.2 et 7.1. Il s’agit encore de l’identification de structure propre, mais cette fois au vu de l’observation d’un certain nombre de ses entrées et sorties résumées par des matrices de covariances croisées successives. Pour cette méthode, voir [32].
- Identification sous-espace par fusion de données de capteurs mobiles, voir module 6.2 du rapport d’activités 2001. Il s’agit de l’identification de structure propre par traitement conjoint de signaux enregistrés à des moments différents, et sous des excitations différentes. Pour cette méthode, voir les articles [14, 15].
- Détection d’endommagements, voir modules 3.1, 4.1 et 6.2. Il s’agit, par le traitement des mesures de vibrations, de détection précoce de petites déviations du système par rapport à un état ou un comportement de référence considéré comme normal. Une telle détection précoce de petits endommagements est indispensable à la maîtrise du vieillissement. L’algorithme confronte, à une signature modale de référence, un nouvel enregistrement de données capteurs résumées par des matrices de covariances. Pour cette méthode, voir les articles [BAB00,MHv99].
- Surveillance d’endommagements. Cet algorithme considère le problème de détection sur un enregistrement traité non pas en bloc comme précédemment, mais en-ligne. Pour cette méthode, voir les articles [17].
- Diagnostic modal, voir modules 3.1, et 4.1. Cet algorithme détermine les modes les plus affectés par le changement détecté. Pour ces méthodes, voir les articles [46] [BBMR87a].
- Localisation d’endommagements, voir modules 3.1, 4.1 et 6.2. Il s’agit de déterminer les zones de la structure affectées par l’endommagement et les paramètres structuraux (masses, raideurs) associés. Pour cette méthode, voir les articles [17] [BBGD⁺93], et [35, 46].
- Positionnement optimal de capteurs pour la surveillance. Un critère est calculé qui permet de quantifier la pertinence, pour la surveillance, d’un nombre et d’un positionnement de capteurs

-
- [MHv99] 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.
- [BBG⁺01] M. BASSEVILLE, A. BENVENISTE, M. GOURSAT, L. HERMANS, L. MEVEL, H. VAN DER AUWERAER, « Output-only subspace-based structural identification : from theory to industrial testing practice », *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control* 123, 4 (Special issue on Identification of Mechanical Systems), décembre 2001, p. 668–676.
- [BAB00] M. BASSEVILLE, M. ABDELGHANI, A. BENVENISTE, « Subspace-based fault detection algorithms for vibration monitoring », *Automatica* 36, 1, janvier 2000, p. 101–109.
- [BBMR87a] M. BASSEVILLE, A. BENVENISTE, G. V. MOUSTAKIDES, A. ROUGÉE, « Detection and diagnosis of changes in the eigenstructure of nonstationary multivariable systems », *Automatica* 23, 4, juillet 1987, p. 479–489.
- [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.

donnés. Pour ce critère, voir les articles [BBMR87b,BBGD⁺93].

Ce logiciel a été déposé à l'APP. Il fait l'objet de mise à disposition de tout ou partie de ses modules, auprès de différents partenaires, en particulier de partenaires industriels du projet FLITE, voir module 7.1.

6 Résultats nouveaux

6.1 Observateurs adaptatifs pour la surveillance et le diagnostic

Voir module 3.1.

Mots clés : système non-linéaire, observateur à grand gain, observateur adaptatif, estimation d'états et de paramètres, génération de résidus.

Participants : Qinghua Zhang, Aiping Xu, Olivier Perrin, Michèle Basseville.

Observateurs adaptatifs pour des systèmes non-linéaires Un observateur adaptatif est un algorithme récursif permettant d'estimer conjointement l'état et des paramètres d'un système dynamique, ou d'estimer l'état seul en présence de paramètres inconnus. Nos études sur les observateurs adaptatifs pour des systèmes non-linéaires sont principalement motivées par le diagnostic de pannes dans des systèmes dynamiques non-linéaires (voir le paragraphe suivant).

Durant les deux années précédentes, dans le cadre de la thèse d'Aiping Xu, deux méthodes de conception d'observateurs adaptatifs pour des systèmes non-linéaires ont été développées (une méthode implicite et une autre basée sur un système étendu obtenu en décalant dans le temps les variables du système d'origine). Les inconvénients principaux de ces deux méthodes étaient, d'une part, des conditions d'excitation exigeantes, d'autre part, la quantité élevée de calculs.

Les études de cette année ont permis d'améliorer considérablement la deuxième méthode mentionnée ci-dessus. Nous avons conservé la même structure algorithmique, mais le recours au système étendu n'est plus nécessaire. Le résultat est un observateur adaptatif efficace en terme de quantité de calcul, avec une condition d'excitation beaucoup moins exigeante. Sur le plan théorique, cette nouvelle méthode est à la fois basée sur l'observateur à grand gain et sur un observateur adaptatif linéaire que nous avons développé récemment. Les propriétés principales du nouvel algorithme sont sa convergence globale, sa conception constructive, et sa validité pour une classe de systèmes non-linéaires qui ne peuvent pas être linéarisés par changement de variable. Ces études ont été en partie réalisées en collaboration avec Gildas Besançon du Laboratoire d'Automatique de Grenoble (LAG).

Diagnostic de pannes basé sur des observateurs adaptatifs Les systèmes industriels qui requièrent un dispositif de surveillance ont souvent un comportement significativement non-linéaire. La linéarisation autour d'un point de fonctionnement est souvent inadaptée pour les besoins de la surveillance,

[BBMR87b] M. BASSEVILLE, A. BENVENISTE, G. V. MOUSTAKIDES, A. ROUGÉE, « Optimal sensor location for detecting changes in dynamical behavior », *IEEE Transactions on Automatic Control AC-32*, 12, décembre 1987, p. 1067–1075.

[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.

par conséquent il est important de développer des méthodes de surveillance pour les systèmes non-linéaires. Le problème est formulé comme la détection et le diagnostic des variations du vecteur de paramètres dans un système obéissant à un modèle d'état non-linéaire. Dans le cadre de la thèse d'Ai-ping Xu, deux méthodes de génération de résidus pour le diagnostic de variations paramétriques ont été développées, toutes deux basées sur des observateurs adaptatifs, dans un premier temps pour des systèmes linéaires, puis étendues à des systèmes non-linéaires [44]. L'application de ces méthodes à la surveillance de filtres à particules dans des véhicules diesel sont actuellement à l'étude, dans le cadre de la thèse CIFRE d'Olivier Perrin.

6.2 Identification et surveillance de systèmes dynamiques linéaires. Application aux structures soumises à vibrations

Voir modules 3.1, 4.1 et 7.1.

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

Participants : Michèle Basseville, Albert Benveniste, Laurent Mevel.

Ce travail est conduit en coopération avec Maurice Goursat du projet METALAU de l'INRIA à Rocquencourt, dans le cadre du projet Eurêka FLITE qui fait suite à SINOPSYS, voir modules 4.1 et 7.1.

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

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

où la dimension de l'observation Y_k est beaucoup plus petite que celle de l'état X_k . Nous exploitons, de manière différente pour l'identification et la surveillance, le fait que la matrice d'observabilité \mathcal{O} du couple (H, F) et la matrice de Hankel \mathcal{H} des covariances empiriques des observations ont même noyau à gauche, propriété dite de sous-espace. Notre méthode de surveillance est basée sur l'application de l'approche locale, voir module 3.1, à cette propriété de sous-espace ^[BAB00].

Le travail effectué cette année a comporté plusieurs volets conceptuels, expérimentaux et logiciels.

Sur le plan conceptuel, la version entrée-sortie de notre méthode d'identification sous-espace à base de covariances, utile pour certaines applications, a été entièrement revue [32]. D'autre part, notre méthode de localisation d'endommagements a fait l'objet d'une rédaction détaillée, et soumise à publication dans une revue de mécanique, ce qui poursuit le travail de diffusion amorcé par [14, 15] ^[BAB00, BBG⁺01]. Nous avons aussi proposé une première solution théorique au problème de surveillance de l'amortissement qui résulte de l'un des objectifs du projet Eurêka FLITE (meilleure maîtrise du phénomène dit de «flutter»). L'idée consiste à concevoir un test unilatéral visant à surveiller que l'amortissement décroît vers zéro.

[BAB00] M. BASSEVILLE, M. ABDELGHANI, A. BENVENISTE, « Subspace-based fault detection algorithms for vibration monitoring », *Automatica* 36, 1, janvier 2000, p. 101–109.

[BBG⁺01] M. BASSEVILLE, A. BENVENISTE, M. GOURSAT, L. HERMANS, L. MEVEL, H. VAN DER AUWERAER, « Output-only subspace-based structural identification : from theory to industrial testing practice », *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control* 123, 4 (Special issue on Identification of Mechanical Systems), décembre 2001, p. 668–676.

Sur le plan expérimental, les données disponibles dans FLITE ont été traitées de manière intensive avec nos méthodes d'identification sortie–seule et entrée–sortie, en collaboration avec Maurice Gour-sat [37], voir module 7.1. D'autre part, nous avons poursuivi l'application de notre méthode de localisation d'endommagements, voir module 3.1, au benchmark «steelquake» du COST F3, dans la lignée des expérimentations précédentes [16, 17] ^[MHv99], et des résultats seront présentés à IMAC'03 [35]. Ce travail a été effectué en collaboration avec Amine Hassim et Dominique Chapelle (projet MACS de l'INRIA à Rocquencourt).

Sur le plan logiciel, un effort important a été porté sur la refonte complète de la boîte-à-outils Modal de Scilab, incluant le calcul des jacobiens physiques en plus des jacobiens modaux, voir module 5.2.

6.3 Aspects statistiques de la détection et du diagnostic de pannes pour les systèmes continus

Participant : Michèle Basseville.

Un article invité sur les méthodes statistiques de détection de changements va paraître dans l'UNESCO Encyclopedia of Life Support Systems (EOLSS) [5]. Il introduit des motivations pour la problématique de détection de changements et pour l'approche statistique, et des fondements de la conception d'algorithmes de détection et de diagnostic de changements dans les systèmes continus.

La collaboration avec Igor Nikiforov (université de technologie de Troyes) se poursuit. Nous avons analysé différentes méthodes statistiques de réjection de nuisance d'une part, et de test d'hypothèses multiples d'autre part, et leur application au problème du diagnostic de pannes a été discutée. Des caractéristiques méthodologiques des différentes méthodes ont aussi été discutées, concernant l'importance de l'information a priori, le choix des critères d'optimalité et des outils théoriques. Notre méthode d'isolation dite de sensibilité, qui procède par projection pour éliminer les paramètres de nuisance, apparaît comme un cas particulier d'une méthode plus générale (et ancienne !) [4, 22]. Le travail de synthèse devrait continuer, et intégrer des approches plus récentes de comparaisons multiples.

6.4 Applications statistiques des systèmes de particules en interaction

Mots clés : HMM, filtrage particulaire, génération de résidus, évènement rare.

Voir modules 3.2, 7.4, 7.5, 8.1 et 8.2.

Participants : Fabien Campillo, Natacha Caylus, Frédéric Céro, Arnaud Guyader, François Le Gland, Laurent Mevel.

Les méthodes particulières sont des méthodes de simulation séquentielles, de type Monte Carlo, dans lesquelles des particules explorent l'espace d'état, en évoluant de manière indépendante comme le processus dynamique sous-jacent, et interagissent sous l'effet d'un mécanisme de sélection, qui

[MHv99] 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.

concentre automatiquement les particules, i.e. la puissance de calcul disponible, dans les régions d'intérêt de l'espace d'état. Cette approche est mise en œuvre dans plusieurs types de problèmes et d'applications : évaluation des risques de collision (projet Hybridage / IST, voir module 7.5), poursuite de mobile dans un réseau cellulaire (sujet de thèse de Natacha Caylus), turbo-estimation : démodulation et estimation des paramètres du canal (contrat Alcatel Espace), identification et surveillance des filtres à particules (FAP) (thèse d'Olivier Perrin, voir module 7.4). Les méthodes particulières sont également utilisées dans le projet VISTA, pour des applications en trajectographie et en vision par ordinateur.

Évaluation d'évènements rares L'évaluation numérique de la probabilité d'occurrence d'un évènement rare — typiquement la probabilité qu'un ensemble B soit atteint par un certain processus de Markov avant le temps T — est un problème délicat mais dont les applications sont nombreuses, par exemple pour l'analyse et le dimensionnement des réseaux de télécommunications, pour l'évaluation de risque de conflit ou de collision dans la gestion du trafic aérien, voir module 7.5, etc. Pour traiter ce type de problème, il existe d'une part des méthodes probabilistes de nature asymptotique, reposant sur la théorie des grandes déviations, et d'autre part des méthodes de simulation, parmi lesquelles la plus répandue est la méthode d'échantillonnage préférentiel ou «importance sampling», où les trajectoires du processus de Markov sont simulées de façon indépendante sous une probabilité instrumentale pour laquelle l'évènement considéré est beaucoup moins rare, et sont pondérées par la dérivée de la probabilité ayant servi à simuler par rapport à la probabilité d'origine.

En collaboration avec Pierre Del Moral, du laboratoire de Statistiques et Probabilités de l'université Paul Sabatier à Toulouse, et avec Pascal Lézaud du Centre d'Études de la Navigation Aérienne (CENA), nous avons étudié [49] une méthode alternative appelée «importance splitting», où une suite d'ensembles emboîtés $B_1 \supset \dots \supset B_n = B$ est définie dont les probabilités d'atteinte par le processus de Markov avant le temps T sont de plus en plus petites ^[GHSZ98,GHSZ99,VAVA91,VAVA94]. Cette méthode est également utilisée dans le projet ARMOR, pour des applications dans le domaine des réseaux de télécommunications. Les trajectoires ayant réussi à atteindre le niveau supérieur avant le temps T sont répliquées, tandis que les trajectoires ayant échoué sont éliminées. Par ce mécanisme de sélection, on construit des trajectoires qui atteignent l'ensemble B , ce qui permet d'estimer des statistiques sur les trajectoires typiques pour lesquelles cet évènement rare s'est réalisé, et la probabilité d'atteinte de l'ensemble B avant le temps T — typiquement un nombre «très petit» — est obtenu comme produit des probabilités d'atteinte d'un niveau à partir du niveau inférieur — c'est-à-dire comme le produit de nombres «raisonnablement petits». La contribution essentielle consiste à formuler le problème en

-
- [GHSZ98] P. GLASSERMAN, P. HEIDELBERGER, P. SHAHABUDDIN, T. ZAJIC, « A large deviations perspective on the efficiency of multilevel splitting », *IEEE Transactions on Automatic Control AC-43*, 12, décembre 1998, p. 1666–1679.
- [GHSZ99] P. GLASSERMAN, P. HEIDELBERGER, P. SHAHABUDDIN, T. ZAJIC, « Multilevel splitting for estimating rare event probabilities », *Operations Research* 47, 4, juillet-août 1999, p. 585–600.
- [VAVA91] M. VILLÉN-ALTAMIRANO, J. VILLÉN-ALTAMIRANO, « RESTART : a method for accelerating rare event simulation », in : *Queueing, Performance and Control in ATM : Proceedings of the 13rd International Teletraffic Congress, Copenhagen 1991*, J. W. Cohen et C. D. Pack (éditeurs), *North-Holland Studies in Telecommunications*, 15, North-Holland, Amsterdam, juin 1991, p. 71–76.
- [VAVA94] M. VILLÉN-ALTAMIRANO, J. VILLÉN-ALTAMIRANO, « RESTART : a straightforward method for fast simulation of rare events », in : *Proceedings of the 1994 Winter Simulation Conference, Orlando 1994*, J. D. Tew, M. S. Manivannan, D. A. Sadowski, A. F. Seila (éditeurs), p. 282–289, décembre 1994.

termes de flots de Feynman–Kac pour la chaîne de Markov induite par les événements discrets que sont les entrées successives dans les ensembles $B_1 \supset \dots \supset B_n = B$.

Approximation particulière pour les chaînes de Markov en milieu aléatoire Également en collaboration avec Pierre Del Moral, nous avons étudié [50] un modèle de Feynman–Kac présentant la caractéristique suivante : la chaîne de Markov $X_n = (X_n^{(1)}, X_n^{(2)})$ à valeurs dans $E_n = E_n^{(1)} \times E_n^{(2)}$ est telle que (i) la première composante $X_n^{(1)}$ est une chaîne de Markov à valeurs dans $E_n^{(1)}$, et (ii) connaissant la réalisation $X^{(1)}$ de la première composante, la seconde composante $X_n^{(2)}$ est une chaîne de Markov à valeurs dans $E_n^{(2)}$, qu'on peut qualifier de chaîne de Markov dans un milieu aléatoire. En toute généralité, connaissant la réalisation $X^{(1)}$ de la première composante, le potentiel peut s'interpréter comme un potentiel aléatoire défini sur $E_n^{(2)}$. La notion d'environnement aléatoire intervient à deux niveaux : les transitions markoviennes aléatoires peuvent par exemple décrire le milieu aléatoire dans lequel la chaîne $X_n^{(2)}$ évolue, et le potentiel aléatoire décrit par exemple un milieu aléatoire absorbant.

Ce modèle très général permet d'offrir un même cadre pour traiter de nombreux problèmes : chaîne de Markov évoluant dans un environnement aléatoire (markovien) et soumise à un potentiel aléatoire, simulation de polymères, chaîne de Markov auto-répulsive ou au contraire avec auto-renforcement, filtrage d'un système conditionnellement linéaire gaussien, etc.

Pour étudier ce modèle, l'idée consiste à introduire (en plus des flots de Feynman–Kac $\gamma_n^{(1)}$ associé à la chaîne $X_n^{(1)}$, et $\gamma_n^{(2|1)}$ associé à la chaîne $X_n^{(2)}$ connaissant la réalisation $X^{(1)}$) un flot de Feynman–Kac $\gamma_n^{(1,2)}$ associé à la chaîne de Markov $(X_n^{(1)}, \eta_n^{(2|1)})$ à valeurs dans $E_n^{(1)} \times \mathcal{P}(E_n^{(2)})$, où $\eta_n^{(2|1)} = \gamma_n^{(2|1)} / \langle \gamma_n^{(2|1)}, 1 \rangle$ représente le flot normalisé. Il est alors naturel de proposer une approximation particulière pour le flot $\gamma_n^{(1,2)}$, dans laquelle les N particules $(\xi_n^i, \mu_n^i, i = 1, \dots, N)$ évoluent dans l'espace produit $E_n^{(1)} \times \mathcal{P}(E_n^{(2)})$ selon le mécanisme suivant. Dans l'étape de mutation, indépendamment pour tout $i = 1, \dots, N$, la particule ξ_n^i donne lieu à une particule $\xi_{n+1|n}^i$ générée selon le noyau de transition de la chaîne $X_n^{(1)}$, et la particule–mesure μ_n^i évolue selon la transition «déterministe» en dimension réduite et parfois même complètement explicite, paramétrée par $(\xi_n^i, \xi_{n+1|n}^i)$, vérifiée par le flot normalisé $\eta_n^{(2|1)}$, et l'étape de sélection se traduit par une redistribution des particules $(\xi_{n+1|n}^i, i = 1, \dots, N)$. Dans le cas particulier du filtrage d'un système conditionnellement linéaire gaussien, l'algorithme décrit ci-dessus coïncide avec l'algorithme reposant sur l'utilisation de filtres de Kalman en interaction [Car95].

Approximation particulière des mesures finies signées Sous une hypothèse de représentation probabiliste de la dérivée du noyau de transition par rapport à un paramètre du modèle, qui garantit l'absolue continuité du filtre linéaire tangent (c'est-à-dire de la dérivée du filtre par rapport au paramètre) par rapport au filtre, il est naturel de chercher une approximation jointe sous la forme de la distribution de probabilité empirique et d'une mesure empirique pondérée associées à un même système de particules. À l'occasion du stage de DEA de Marion Baudry, un cadre théorique a été proposé pour décrire

[Car95] H. CARVALHO, *Filtrage optimal non-linéaire du signal GPS NAVSTAR en recalage de centrales de navigation*, Thèse de Doctorat, École Nationale Supérieure de l'Aéronautique et de l'Espace, Toulouse, septembre 1995.

et analyser les schémas d'approximation particulière introduits précédemment [CLN01].

Ce problème est très proche du problème de calcul de sensibilité par méthode de Monte Carlo, qui est un sujet très actif en mathématiques financières. Ceci a motivé les contacts établis avec le projet MATHFI de l'INRIA à Rocquencourt, en particulier dans le cadre de la participation à un projet de l'Institut Lyapunov.

6.5 Surveillance des systèmes distribués

Voir modules 3.3, 4.2 et 7.6.

Mots clés : système distribué, système à événements discrets, réseau de Petri, réseau d'automates, réseau bayésien, HMM, multi-agents.

Participants : Éric Fabre, Albert Benveniste, Stefan Haar, Vincent Pigourier, Samy Abbes, Bruno Marquié.

Pour la description des systèmes distribués à surveiller, le cadre formel des réseaux de Petri (RdP) a été abandonné au profit du formalisme plus général des «réseaux bayésiens de systèmes dynamiques». Dans ce cadre, un système est vu comme un automate agissant sur un ensemble de variables d'état au moyen de «pièces». Les variables d'état jouent le rôle des places d'un RdP, quant aux pièces, elles correspondent aux transitions. La composition de systèmes se fait par partage de variables, sur lesquelles plusieurs composants peuvent donc agir. Un système dynamique distribué est ainsi obtenu par produit de composants élémentaires. Cette construction est très proche des techniques de définition de champs de Markov (ou de réseaux Bayésiens), à partir de fonctions de potentiel agissant sur une partie seulement des variables du champ. La différence principale (outre le cadre stochastique) réside donc dans l'introduction de la dynamique.

Ce parallèle entre des modèles familiers en traitement du signal et des images, et les systèmes dynamiques distribués en automatique, se révèle très fécond, tant sur le plan formel de l'étude des grands systèmes, que sur le plan algorithmique. Par exemple, les réseaux bayésiens traduisent les propriétés de factorisation d'une distribution jointe de probabilité. Pour un système distribué, le réseau d'interaction traduit les propriétés de factorisation de l'ensemble des trajectoires du système global, dans une sémantique de concurrence vraie. Ce résultat remarquable permet de transcrire directement pour les systèmes distribués toute une gamme d'algorithmes d'inférence efficaces conçus pour les réseaux bayésiens et les modèles graphiques. Une application naturelle de cette transcription consiste à retrouver toutes les trajectoires du système distribué qui sont compatibles avec un ensemble d'évènements observés lors de son évolution, ces observations étant elles-mêmes distribuées (i.e. collectées sur différents composants). L'avantage principal de ces méthodes est qu'elles ne manipulent que la forme factorisée de l'ensemble des trajectoires compatibles avec les observations. Ainsi, il n'est jamais nécessaire de manipuler des états globaux du système, ce qui serait impraticable ; on n'utilise à la place que des états locaux de composants, en assurant leur cohérence avec les états des composants voisins. Qui plus est, cette algorithmique de reconstruction des trajectoires cachées peut être distribuée : on associe alors un «superviseur local» à chaque composant, chargé de reconstruire la trace des trajectoires globales sur

[CLN01] F. CÉROU, F. LE GLAND, N. J. NEWTON, « Stochastic particle methods for linear tangent filtering equations », in : *Optimal Control and PDE's — Innovations and Applications. In honor of Alain Bensoussan on the occasion of his 60th birthday*, J.-L. Menaldi, E. Rofman, et A. Sulem (éditeurs), IOS Press, Amsterdam, 2001, p. 231–240.

ce composant, à partir des observations dont il dispose localement et d'informations échangées avec les superviseurs des composants voisins. Ceci permet de définir une véritable architecture distribuée de supervision [28, 27, 26].

Un prototype de cette algorithmique a été développé. Il a permis de construire un superviseur distribué pour une maquette de réseau SDH («hiérarchie numérique synchrone» pour les transmissions haut débit), voir le projet MAGDA, module 7.6. Ce prototype a été intégré dans une plate-forme de gestion de réseau, et est actuellement en cours d'évaluation.

Les recherches actuelles sur ce thème portent sur trois points. Il s'agit d'une part d'étendre le cadre algorithmique. La première étape a consisté à dégager un cadre théorique adéquat, notamment en exhibant une axiomatique minimale permettant de mettre en oeuvre des algorithmes distribués. Cela a permis de lever en partie une limitation des algorithmes d'inférence distribués. Ceux-ci s'appliquaient en effet à des systèmes dynamiques ayant une structure d'interaction en arbre, contrainte pénalisante en pratique. Or il a été mis en évidence récemment, par le biais des turbo-codes, que des algorithmes d'inférence destinés aux arbres se comportaient relativement bien sur des graphes cycliques. Le cadre axiomatique précité nous a permis de comprendre comment pouvaient se traduire les algorithmes de type «turbo» pour les systèmes dynamiques distribués, et d'étudier en partie leurs propriétés de convergence. Les efforts vont se poursuivre maintenant vers la robustification de ces algorithmes, pour traiter notamment des pertes d'observations ou des connaissances incomplètes sur le modèle surveillé.

Un second axe de recherche porte sur la définition d'un cadre stochastique adéquat pour les systèmes dynamiques distribués. La difficulté est de probabiliser l'ensemble des trajectoires d'un système distribué sans perdre le caractère concurrent des interactions. Plus précisément, tant que deux composants n'ont pas d'interaction, on souhaite qu'ils se comportent comme s'ils étaient indépendants au sens stochastique. Cela n'est pas permis par les dynamiques markoviennes habituelles, qui imposent une notion de temps global, et donc un entrelacement temporel des événements concurrents. Nous avons proposé plusieurs façons de construire un cadre stochastique probabilisant des ordres partiels d'événements. La première solution, dite de randomisation partielle [?], raisonne à horizon fini, et donc ne permet pas d'accéder à des théorèmes limites. Une deuxième approche, récursive, et donc à horizon infini, consiste à probabiliser des ensembles de trajectoires de plus en plus longues, celles-ci étant directement vues comme des ordres partiels d'événements. On définit alors une filtration sur une structure de données décrivant ces trajectoires, c'est à dire le «dépliage» de l'automate décrivant le système distribué [BFH01]. Cette approche n'est cependant effective que sur une classe limitée de modèles, le cas général pouvant se heurter à la difficulté de construire une filtration adéquate. Enfin, une troisième voie consiste à s'appuyer sur une autre structure de données pour décrire les trajectoires du système : le «dépliage par clusters (cluster unfolding)», qui permet de développer un modèle probabiliste markovien des exécutions en parallèle dans un système distribué [51].

Enfin, un troisième axe de recherche concerne l'utilisation directe du dépliage d'un système distribué, structure bien connue, pour résoudre le problème de diagnostic distribué. Ce travail a été mené à bien pour ce qui concerne le diagnostic centralisé, c'est à dire l'identification récursive des trajectoires globales du système expliquant un ordre partiel d'événements observés [48]. Travailler sur des trajectoires globales (et donc des états globaux) est illusoire pour traiter de gros systèmes. Les efforts

[BFH01] A. BENVENISTE, E. FABRE, S. HAAR, « Markov nets : Probabilistic models for distributed and concurrent systems », *Publication Interne n°1415*, IRISA, septembre 2001, <ftp://ftp.irisa.fr/techreports/2001/PI-1415.ps.gz>.

actuels visent à résoudre ce problème de façon distribuée, ce qui revient à exhiber une propriété de factorisation du dépliage d'un système distribué, puis à construire cette structure à l'aide de plusieurs agents coopérants.

6.6 Codes correcteurs et modèles graphiques

Voir module 4.2.

Mots clés : turbo-code, modèle graphique, réseau bayésien, décodage conjoint source-canal.

Participants : Éric Fabre, Aline Roumy, Arnaud Guyader.

Glossaire :

Turbo-code Codes correcteurs d'erreurs introduits par Berrou, Glavieux et Thitimajshima [BGT93], alliant deux codes convolutifs via un entrelaceur. Le nom provient de l'algorithme itératif de décodage, manipulant une information «soft», de nature probabiliste.

Il a récemment été établi par McEliece, MacKay et Cheng [MMC98] 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 recherches dans ce domaine, dans le cadre de la thèse d'Arnaud Guyader [2], concernaient deux points : (i) obtenir une meilleure compréhension des performances des méthodes de décodage turbo, et (ii) mettre à profit des méthodes alternatives du traitement du signal et des images pour résoudre le problème de décodage, afin d'étudier les propriétés de codes plus courts et plus denses. Pour le premier point, une étude bibliographique très large a permis de synthétiser les résultats disponibles

[BGT93] C. BERROU, A. GLAVIEUX, P. THITIMAJSHIMA, « Near Shannon limit error-correcting coding and decoding : turbo codes », in : *Proceedings of the IEEE International Conference on Communications, Geneva 1993*, 2, IEEE-CS, p. 1064–1070, mai 1993.

[MMC98] R. J. MCELIECE, D. J. C. MACKAY, J.-F. CHENG, « Turbo decoding as an instance of Pearl's belief propagation algorithm », *IEEE Journal on Selected Areas in Communications SAC-16*, 2, février 1998, p. 140–152.

sur les propriétés asymptotiques des codes graphiques, sous hypothèse d'un décodage par propagation de croyance. Il a été mis en évidence que, à densité de «parity checks» constante, les codes graphiques ont une structure en arbre dans un voisinage croissant autour d'un sommet donné, lorsque la taille du code tend vers l'infini. Par ailleurs, dans une structure en arbre, l'information apportée par chaque mesure (ou observation) décroît exponentiellement avec la distance à un sommet (bit) donné, la vitesse de décroissance étant fonction du rapport signal à bruit. En revanche, le nombre de points de mesure disponibles autour de ce bit augmente exponentiellement avec la distance, sur un arbre régulier. Pour certains niveaux de bruit, c'est donc un phénomène de compensation qui porte à un l'information disponible sur chaque bit, ce qui aboutit à un décodage sans erreur. Hors du cas asymptotique, ce raisonnement bute sur la quantité finie de points de mesure, et sur la structure cyclique du graphe. Des techniques d'«exit chart» ont mis en évidence que les codes courts, décodés par propagation de croyance, accusaient une perte significative par rapport au cas asymptotique. L'origine de cette perte, quantité finie d'information disponible ou inadéquation de l'algorithme de décodage, n'a pas encore été identifiée. Les premières tentatives pour construire des décodeurs mieux adaptés au problème des cycles n'ont pas permis d'obtenir des gains de décodage pour les codes courts. Cette question demeure donc ouverte pour le moment.

Par ailleurs, une nouvelle approche de conception de codes correcteurs est étudiée dans le cadre d'une collaboration avec S. Verdú (Princeton University) et G. Caire (Institut Eurecom). Ici, nous choisissons d'optimiser un code admettant une représentation graphique en tenant compte de la sous-optimalité du décodage par propagation de croyance. Ainsi, nous nous intéressons à un type particulier de turbo-code série, les codes «irregular repeat accumulate» (IRA) ^[HKM00]. Ce choix est motivé par la faible complexité des codes constitutifs et la possibilité de ne stocker que l'algorithme d'entrelacement et non la totalité du graphe comme pour les codes de Gallager. D'autre part, ces codes disposent de différents degrés de liberté et nous proposons alors quatre méthodes d'optimisation en approximant la densité des messages générés au cours du décodage par des variables mono-dimensionnelles. Nous obtenons également des résultats intéressants quant à la stabilité de ces codes. Les codes ainsi obtenus ont des performances (évaluées par l'évolution exacte de densités) comparables à celles des codes de Gallager.

Le principe des turbo-codes est général et peut s'appliquer à de nombreux problèmes de traitement du signal pour les télécommunications, par exemple l'égalisation ou la récupération de porteuse, qui peuvent bénéficier du gain apporté par le décodage de canal. En effet, les codes correcteurs offrent aujourd'hui de très bonnes performances. Ainsi, la version irrégulière des codes de Gallager optimisés par Urbanke et al. ^[RU01] s'approche de la limite de Shannon à 0.02370 dB pour un taux de codage de 1/2. En revanche, à ce rapport signal à bruit, les méthodes actuelles de récupération de porteuse ne marchent pas, si bien que les très bonnes performances des codes ne peuvent être complètement exploitées. Dans le cadre du stage DEA de Assane Lo, nous nous sommes intéressés à tenir compte du codage dans les algorithmes de récupération de porteuse, afin d'en améliorer les performances. De plus, avec Inbar Fijalkow (ETIS à Cergy-Pontoise), Alex J. Grant (Institute for Telecommunications Research, Australia) et Didier Pirez (Thalès), nous avons poursuivi notre collaboration et avons proposé une nouvelle analyse du turbo-égaliseur en utilisant comme outil d'analyse l'information mutuelle.

[HKM00] J. HUI, A. KHANDEKAR, R. J. MCELIECE, « Irregular repeat-accumulate codes », in : *Proceedings of the 2nd International Symposium on Turbo Codes and Related Topics, Brest 2000*, ENST, p. 1–8, septembre 2000.

[RU01] T. J. RICHARDSON, R. L. URBANKE, « Efficient encoding of low-density parity-check codes », *IEEE Transactions on Information Theory IT-47*, 2, février 2001, p. 638–656.

6.7 Radio logicielle et égalisation

Participant : Jacques Palicot.

Radio intelligente En collaboration avec Christian Roland, ATER à l'IUT de l'université de Rennes 1, nous avons travaillé sur les méthodes permettant de qualifier les limites de l'identification aveugle du standard de télécommunication. Nous avons montré que le taux de bonnes reconnaissances de standards avec un réseau de neurones RBF est supérieur à 95 % [41].

Paramétrisation Les études de paramétrisation font partie d'un nouveau domaine issu de la radio logicielle. Nous pouvons distinguer deux types de paramétrisation : par fonctions communes ou par opérateur commun. L'objectif de ce travail est double. Il s'agit, lorsqu'une fonction ou un opérateur commun est identifié, de le réaliser de manière optimale, soit en logiciel (DSP), soit sous forme de circuits reconfigurables (FPGA). Cette optimalité permet de gagner à la fois en temps d'exécution et en taille mémoire. Le second intérêt concerne la taille du logiciel du standard à (télé-) charger. De fait, le logiciel de la fonction n'a plus besoin d'être chargé, un simple appel à cette fonction associé à d'éventuels paramètres permet de la réaliser.

Notre travail est parti de la constatation qu'une très grande majorité des fonctions utilisées dans les récepteurs peuvent se réaliser dans le domaine fréquentiel, et ceci pour tous les standards (y compris les futurs standards). Cette constatation se traduit par le fait que l'opérateur FFT pourrait être très utilisé et devenir un opérateur de base qui serait réalisé «en dur». Il ne s'agit pas ici de rappeler toutes les architectures mais de souligner les fonctions qui sont nécessaires à ces récepteurs. Parmi celles-ci nous retrouvons les fonctions de filtrage, d'égalisation, d'estimation de canal, de désétalement, de détection multi-utilisateurs, de récupération de rythme et de porteuse, de sous-échantillonnage, de décodage canal, etc. L'étude nous a permis de mettre en évidence que la quasi majorité de ces fonctions se réalisaient simplement dans le domaine fréquentiel. Il reste à montrer que cela peut aussi être vrai pour le décodage de canal.

Égalisation Alban Goupil, doctorant CIFRE à FTR&D, continue à travailler sur l'égalisation aveugle et pondérée. Nous avons proposé une nouvelle classe d'algorithmes pour l'égalisation aveugle. Cette classe, appelée «algorithmes à norme constante», généralise le très connu algorithme CMA. De plus, appliquée à des modulations carrées, l'amélioration des performances est considérable : un gain de 6 db en erreur quadratique moyenne a été obtenu sur un canal de Lee [31]. Nous avons aussi travaillé sur un nouveau type d'algorithme récemment introduit en égalisation : le split-LMS. Nous avons montré que tel qu'il est classiquement utilisé, il n'est pas optimal et nous avons aussi proposé la manière de le rendre optimal, grâce à l'obtention théorique des pas de convergence optimaux [40]. Nous continuons à travailler sur l'ERDP, où des résultats intéressants sont attendus très prochainement. En particulier, l'algorithme CNA sera étudié lors de la convergence du filtre FF de l'ERDP. Le modèle à base de chaîne de Markov, qui avait permis d'obtenir l'expression de la propagation des erreurs, sera étendu de manière à obtenir l'expression de la distribution des «bursts» d'erreurs consécutives.

En ce qui concerne le domaine de l'égalisation en bloc, travail effectué en collaboration avec l'équipe de Kostas Berberidis à l'université de Patras, le principal résultat réside en la définition d'un

nouvel égaliseur à retour de décisions. Les coefficients de cet égaliseur sont calculés à partir de l'estimation de la réponse impulsionnelle du canal. Cette estimation est réalisée à l'aide d'un algorithme SIMO (le SRM) dans le domaine fréquentiel, l'estimateur de canal étant un estimateur semi-aveugle en bloc, ce qui est tout à fait original. De plus, cet ERD est intrinsèquement résistant au phénomène de propagation des erreurs [24, 43].

6.8 Synthèse de filtres numériques

Participants : Jean-Jacques Fuchs, Bernard Delyon.

Les télécommunications numériques ont créé de nouveaux besoins en matière de filtrage numérique, notamment dans le domaine des filtres interpolateurs qui jouent un rôle important dans la synchronisation

Dans un contexte d'estimation de temps de retards, nous avons été amené à trouver l'expression de la fonction de reconstruction de norme L_1 minimale permettant d'interpoler exactement un signal $x(t)$ à bande étroite sur-échantillonné. Dans le cas de sur-échantillonnage, l'information disponible est en effet redondante et il existe une infinité de façons de reconstruire le signal à un instant quelconque. Elles utilisent toutes un nombre infini de points d'échantillonnage. La fonction de reconstruction de norme L_1 minimale est parcimonieuse et utilise une sélection minimale de points satisfaisant tout juste le critère de Nyquist (Shannon).

Dans ce même contexte, un filtre interpolateur a pour but de reconstruire un signal à un instant τ à l'aide des $2m$ échantillons disponibles $x(t_i)$ les plus proches de τ . La reconstruction est alors inexacte et la parcimonie recherchée bien plus grande. La dualité entre L_1 et L_∞ nous a amenés à chercher les pondérations $\{a_i\}$ fonction de τ qui réalisent:

$$\min_{\{a_i\}} \max_{x \in L_\infty} |x(\tau) - \sum_{i=-m}^{m-1} a_i x(t_i)|$$

pour $x(t)$ à bande étroite. On peut effectivement passer au dual et faire apparaître un problème voisin de celui que nous savons résoudre faisant intervenir la norme L_1 de la fonction de reconstruction dont les pondérations $\{a_i\}$ sont alors des échantillons, mais nous n'obtenons qu'une solution approchée, sauf dans le cas où $m = 1$.

Cette solution admet une forme analytique simple qui la rapproche des filtres interpolateurs déduits des polynômes interpolateurs de Lagrange. De la même façon que la fonction sinus cardinal peut être vue comme un polynôme de Lagrange valant un en zéro et zéro sur les autres entiers, la solution approchée que nous obtenons revient à compléter d'une façon minimale les points d'échantillonnage disponibles t_i et à construire les polynômes de Lagrange associés à cette sélection minimale.

7 Contrats industriels (nationaux, européens et internationaux)

7.1 Exploitation des données de vol — Projet Eurêka FLITE

Voir modules 4.1, 5.2 et 6.2.

Contrat INRIA 2 02 C 0040 — mai 2001/octobre 2003.

Participants : Laurent Mevel, Yann Veillard, Albert Benveniste, Michèle Basseville, Auguste Sam.

Cette activité est conduite en collaboration avec Maurice Goursat (projet METALAU de l'INRIA à Rocquencourt).

Le projet Eurêka FLITE («Flight Test Easy») concerne le domaine de l'aéronautique. Il est coordonné par le laboratoire d'essais Sopemea, et a comme partenaires les constructeurs Dassault–Aviation et AeroMatra Airbus (France), LMS et KUL (Belgique), l'université de Cracovie et le constructeur PZL–Swidnik (Pologne), l'INRIA (projets SIGMA2 et METALAU).

Il fait suite au projet Eurêka SINOPSYS coordonné par la société belge LMS (un des deux leaders mondiaux du domaine), au cours duquel les travaux sur l'identification et la surveillance modale des structures, en ambiance de travail et sous excitation naturelle non observée, se sont traduits par un transfert à LMS d'une version pré-alpha d'un prototype industriel développé par Laurent Mevel chez LMS, ainsi que par une boîte à outils pour Scilab développée par Maurice Goursat [GBBM00], voir aussi [BBG⁺01,MHv99].

Le développement de nouvelles générations d'avions exige une exploration précautionneuse du comportement aéroélastique de la structure, dans tout le domaine de vol. On réalise cela en combinant des tests au sol et des essais en vol. Le projet FLITE porte sur l'exploitation des données de vols d'essai, pour l'analyse du comportement dynamique de la structure. Il a pour premier objectif d'améliorer la qualité de l'information extraite des vols d'essai, en particulier par l'utilisation des données de vol sous excitation naturelle (et non plus seulement sous excitation contrôlée avec les ailerons), ce qui devrait permettre un élargissement du domaine de vol. Un deuxième objectif est de permettre une amélioration des procédures d'essais en vol proprement dites. Un des exemples d'application visés concerne l'A3XX.

Notre savoir-faire en matière d'identification de structures vibrantes sous excitation ambiante, et donc à entrées inconnues, est évidemment précieux dans ce projet. Nous (les projets INRIA impliqués) sommes responsables du lot «développement des algorithmes et méthodes associées», et de la rédaction des rapports correspondants, et Albert Benveniste assiste la Sopemea dans la coordination scientifique du projet.

Le travail effectué cette année a comporté trois volets, conceptuel, expérimental et logiciel.

Sur le plan conceptuel, nous avons commencé à étudier une première solution théorique au problème de surveillance de l'amortissement qui résulte de l'un des objectifs du projet (meilleure maîtrise du phénomène dit de «flutter»). L'idée consiste à concevoir un test unilatéral visant à surveiller que l'amortissement décroît vers zéro. Les premiers essais montrent rapidement les limites de cette pro-

[GBBM00] M. GOURSAT, M. BASSEVILLE, A. BENVENISTE, L. MEVEL, « A Scilab toolbox for output only modal analysis and diagnosis », in: *18th International Modal Analysis Conference (IMAC–XVIII)*, San Antonio, SEM, Inc., février 2000.

[BBG⁺01] M. BASSEVILLE, A. BENVENISTE, M. GOURSAT, L. HERMANS, L. MEVEL, H. VAN DER AUWERAER, « Output-only subspace-based structural identification : from theory to industrial testing practice », *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control* 123, 4 (Special issue on Identification of Mechanical Systems), décembre 2001, p. 668–676.

[MHv99] 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.

mière méthode, et l'effort des mois à venir va porter sur cette question.

Sur le plan expérimental, nous avons traité les données de plusieurs benchmarks à l'aide de nos méthodes d'identification sortie-seule et entrée-sortie [37], voir module 6.2. Les données dites B01 résultent d'essais au sol. Elles correspondent à des données entrées-sorties, permettant de tester la validité et l'efficacité de nos méthodes d'analyse modale dans ce cadre-là (et dans le cadre sorties seules). Ces données ont fait l'objet d'une publication en tant que volet applicatif dans [32]. Les données Airbus sont des données simulées. Elles correspondent à des données sorties seules simulant le comportement d'un avion en situation de flottement. Les techniques d'analyse modale ont été testées avec succès sur ces données. Les techniques de détection de «flutter» en cours de développement seront validées sur ces données et sur les futures données disponibles dans le cadre du projet FLITE.

Sur le plan logiciel, un effort important a été porté sur la refonte complète de la boîte-à-outils Modal de Scilab, voir module 5.2. Les versions entrée-sortie [32] et multi-patch (ou polyréférence) [14, 15] de notre méthode d'identification sous-espace à base de covariances, ont été incorporées [37]. Divers utilitaires ont été introduits, afin de faciliter la tâche de l'utilisateur :

- pour l'identification, une méthode de sélection de modes basée sur une interface graphique avec visualisation des courbes de fréquences, des courbes d'amortissements, ainsi que des coefficients de corrélation entre déformées a été développée pour faciliter le dépouillement des données.
- pour la détection, des modules graphiques d'affichage des résultats sur structure, ainsi que des outils de comparaison et de sélection pour l'appariement entre les modes éléments finis et les modes identifiés ont été développés.

Un travail important de design et d'intégration des différentes techniques d'analyse modale, de détection et de localisation a été effectué au cours de l'année par Laurent Mevel et Yann Veillard.

7.2 Évaluation et surveillance des structures — Réseau Growth SAMCO

Voir modules 4.1, 5.2, et 6.2. Contrat CNRS 500232 — février 2002/septembre 2005.

Participant : Michèle Basseville.

Ce réseau thématique a été créé à l'automne 2001 dans le cadre du programme Growth. Il a pour objectif de créer un centre de compétences et de référence dans le domaine de la surveillance, du monitoring et du contrôle de structures civiles (ponts, etc.) et industrielles, en particulier dans les infrastructures de transport.

Sur proposition de plusieurs partenaires de ce réseau, nous sommes devenus membre participant, impliqué plus particulièrement dans le groupe thématique «Monitoring and Assessment». La participation à ce groupe est un complément intéressant à la diffusion de notre savoir-faire en surveillance vibratoire.

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

Contrat INRIA I 99 C 0303 — 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 à 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 Renault-INRIA (thèse d'Arnaud Clavel), cette étude a eu pour objectif de concevoir et de mettre en œuvre des méthodes d'identification répondant aux besoins d'estimation de certains paramètres essentiels à la conception d'un véhicule. Nous avons développé une méthode reposant sur un modèle hystérétique, particulièrement adaptée à des phénomènes de frottement à sec. Elle a été expérimentée avec succès sur un système de suspension avec des ressorts à lame, sur des butées de choc, et sur le mécanisme de la direction assistée d'un véhicule. Ces études ont été conclues avec la soutenance de la thèse d'Arnaud Clavel [1].

7.4 Modélisation et diagnostic de pannes dans des organes de véhicules automobiles à basse consommation — Contrat Renault

Contrat INRIA 1 01 C 0104 — janvier 2001/décembre 2003.

Participants : Olivier Perrin, Qinghua Zhang, Michèle Basseville.

Cette activité est conduite en collaboration avec Michel Sorine (projet SOSSO de l'INRIA à Rocquencourt).

Afin de réduire la consommation de carburant et les émissions de polluants de ses futurs véhicules, Renault étudie de nouveaux organes reposant sur les technologies les plus avancées en matière de motorisation et de traitement anti-pollution. Devant la grande complexité technologique de ces nouveaux organes, il est nécessaire de développer des dispositifs de surveillance pour la détection et le diagnostic de leurs éventuels défauts de fonctionnement, afin de faciliter leur maintenance et de garantir le respect des normes de pollution automobile.

Dans le cadre d'une convention CIFRE Renault-INRIA (thèse d'Olivier Perrin), les études ont porté sur les filtres à particules pour des véhicules à combustion diesel, notamment sur les filtres catalytiques qui détruisent continuellement les particules filtrées par des réactions chimiques à l'aide de catalyseurs, par opposition aux filtres conventionnels qui nécessitent des phases de régénération pour brûler à haute température les particules filtrées.

La modélisation de ces filtres a bien avancé. Elle s'inscrit dans la série d'études du projet SOSSO sur la modélisation de certains organes de véhicules automobiles à basse consommation, tels que les pots catalytiques, les capteurs de gaz et les piles à combustible. Ces modèles constituent une classe particulière d'équations de réaction-diffusion d'où un modèle générique a été dégagé. En vue de la conception d'algorithmes pour l'« On-Board Diagnosis » (OBD), des simplifications du modèle de filtres à particules ont été effectuées, qui réduisent le modèle d'équation aux dérivées partielles à un modèle d'équation différentielle ordinaire avec un petit nombre d'états. L'étape-clé des simplifications est un bon choix de la discrétisation de l'espace.

À partir du modèle simplifié, des études ont débuté pour concevoir des algorithmes permettant de surveiller l'état de santé des filtres. Les approches à l'étude sont, d'une part, les méthodes de surveillance à l'aide d'observateurs adaptatifs, voir module 6.1, d'autre part, les méthodes basées sur des algorithmes de filtrage non-linéaire, voir module 6.4, avec la participation de Frédéric Cérou et de François Le Gland.

7.5 Analyse stochastique et contrôle distribué des systèmes hybrides — Projet IST HYBRIDGE

Voir module 6.4.

Contrat INRIA 1 02 C 0037 — janvier 2002/décembre 2004

Participants : Fabien Campillo, Frédéric Cérou, François Le Gland.

Le projet IST HYBRIDGE concerne l'analyse stochastique et le contrôle distribué des systèmes hybrides, avec comme domaine d'application privilégié la gestion de conflit dans le trafic aérien. Il est coordonné par le National Aerospace Laboratory (NLR, Pays-Bas) et a comme partenaires les universités de Cambridge (Royaume-Uni), de Brescia et de l'Aquila (Italie), de Twente (Pays-Bas), National Technical University of Athens (NTUA, Grèce), le Centre d'Études de la Navigation Aérienne (CENA), le centre expérimental d'Eurocontrol, AEA Technology et BAE Systems (Royaume-Uni), l'INRIA (projet SIGMA2).

Notre participation dans ce projet concerne le lot consacré à l'utilisation de systèmes hybrides stochastiques pour la modélisation des risques d'accident, et le lot consacré aux méthodes de décomposition et d'évaluation de risque, et leur mise en œuvre à l'aide de méthodes de Monte Carlo conditionnelles.

À l'occasion du stage de DESS de David Le Brun, les algorithmes classiques de détection de conflit, reposant sur une approche géométrique ^[PE97] ou sur une approche probabiliste ^[PHLS00] ont été étudiés, ainsi que l'approche proposée au NLR et généralisant le modèle de Reich pour l'évaluation du risque de collision ^[BB93], et des premiers essais numériques ont été effectués. Ce problème a servi de motivation pour l'étude de l'algorithme d'«importance splitting» à l'évaluation d'évènements rares, voir module 6.4.

7.6 Diagnostic de pannes dans les réseaux de télécommunications — Projet RNRT exploratoire MAGDA2

Voir modules 3.3, 4.2 et 6.5.

Contrat INRIA 2 01 C 0694 MPR 01 1 — novembre 2001/novembre 2003

Participants : Éric Fabre, Albert Benveniste, Stefan Haar, Vincent Pigourier.

Glossaire :

Gestion de réseau Désigne la couche haute de gestion d'un réseau de télécommunications, c'est-à-dire les opérations de supervision : surveillance, maintenance, etc.

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 3.2.

-
- [PE97] R. A. PAIELLI, H. ERZBERGER, « Conflict probability estimation for free flight », *AIAA Journal of Guidance, Control and Dynamics* 20, 3, mai-juin 1997, p. 588-596.
- [PHLS00] M. PRANDINI, J. HU, J. LYGEROS, S. SASTRY, « A probabilistic approach to aircraft conflict detection », *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems* 1, 4 (Special issue on Air Traffic Control, Part I), décembre 2000, p. 199-220.
- [BB93] G. J. BAKKER, H. A. P. BLOM, « Air traffic collision risk modelling », in: *Proceedings of the 32nd Conference on Decision and Control, San Antonio 1993*, IEEE-CSS, p. 1464-1469, décembre 1993.

Cette activité est partagée avec Claude Jard (projet TRISKELL). Elle se situait initialement dans le cadre de la CTI–CNET 95 1B 151, puis a été étendue dans le cadre du projet RNRT exploratoire «Modélisation et Apprentissage pour une Gestion Distribuée des Alarmes» de 1998 à novembre 2001. Le nouveau projet RNRT exploratoire MAGDA2 le prolonge jusqu'en novembre 2003. Outre les projets TRISKELL et SIGMA2, et également le projet AÏDA de l'IRISA, les participants de ce projet sont France Télécom R&D (maître d'œuvre), Alcatel, ILOG et l'université de Paris–Nord.

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'alarmes, confusions possibles, etc.),
- viser une mise en œuvre du logiciel de diagnostic qui soit répartie sur le réseau.

Une technologie originale de conception d'algorithmes distribués a été développée. Elle se fonde sur une modélisation d'un système distribué sous forme de réseau d'automates. Ce réseau d'automates est vu comme une généralisation des réseaux bayésiens, ou champs de Markov, à des systèmes dynamiques. Ce parallèle permet d'étendre d'un domaine à l'autre toute une algorithmique d'inférence bien fondée, qui est par nature facilement distribuable.

Par ailleurs, un cadre stochastique nouveau a été proposé pour ces systèmes distribués. Il repose sur une notion nouvelle de réseau de Petri stochastique, conforme au point de vue dit de la «concurrence vraie». Cette technique permet d'assurer que deux composants du modèle n'ayant pas d'interaction (comportements concurrents) sont aussi indépendants au sens stochastique du terme.

Le projet MAGDA, labellisé en septembre 1998 et achevé en novembre 2001, se proposait de tester «en grand» cette approche sur un cadre plus industriel. Une chaîne complète de supervision a été développée pour une maquette de réseau SDH. La chaîne comporte (i) la construction modulaire du modèle de réseau, par interconnexion de composants types, (ii) l'algorithmique distribuée de supervision, alimentée par les alarmes reçues du réseau par une vraie plate-forme industrielle de gestion de réseau (ALMAP), et (iii) un outil de visualisation des résultats du diagnostic le plus vraisemblable, vu comme un graphe de causalité entre défaillances.

Dans le cadre du projet MAGDA2, la collaboration avec le projet TRISKELL vise la construction automatique du modèle de réseau surveillé à partir de la description UML de ce dernier. Le modèle interne ainsi dégagé servira directement de base d'inférence pour une algorithmique distribuée de supervision. Celle-ci sera réécrite dans un langage facilement disponible dans une plate-forme de gestion de réseau, typiquement dans un langage de programmation par règles. Il s'agit enfin d'étendre cette technologie à des réseaux hétérogènes, en s'appuyant sur le modèle GMPLS (modèle général de communication en mode circuit, sur réseau routé comme IP, ou commuté comme SDH et WDM).

7.7 Transmission robuste de vidéo vers les mobiles — Projet RNRT précompétitif VIP

Contrat INRIA 2 01 A 0650 MC 01 1 — octobre 2001/juin 2004

Participants : Éric Fabre, Aline Roumy.

Le projet RNRT précompétitif VIP a démarré en octobre 2001 pour une durée de 33 mois. Outre les projets TEMICS (Christine Guillemot), SIGMA2 et PLANET de l'INRIA, il regroupe comme partenaires

industriels Thales (maître d'œuvre), France Télécom R&D, Philips, Starnet, et comme partenaires académiques l'ENST, Supélec et l'ENSEA.

Le projet VIP «Vidéo sur IP» se propose de tester des méthodes robustes de transmission de vidéo vers les mobiles, avec utilisation de protocole IP. L'objectif est d'aboutir à une maquette en fin de projet. Les travaux prévoient, outre la caractérisation des canaux de transmission, d'explorer diverses techniques d'introduction de redondance dans la chaîne de transmission : redondance interne de la source (codes DFT), descriptions multiples, codage de canal, etc., et d'appliquer en réception des méthodes de décodage conjoint robuste (source + canal). Un accent particulier sera mis sur la compatibilité de ces techniques avec les normes existantes H263+ pour la transmission de vidéo.

Le début des travaux s'est focalisé essentiellement sur le modèle du canal de transmission. Celui-ci peut altérer le signal transmis de deux manières principales : par des erreurs binaires et par des pertes de paquets. Nous cherchons donc à nous inspirer des techniques de codage espace-temps, conjuguant les aspects de redondance en temps (typiquement un code correcteur), et de redondance en espace (typiquement des informations corrélées circulant sur des canaux distincts).

7.8 Amélioration du calcul du taux d'erreur et diagnostic à partir du diagramme de l'œil — Contrat Alcatel

Contrat INRIA 1 02 C 0402 — juin 2002/novembre 2002.

Participants : Frédéric Cérou, Albert Benveniste.

Un problème particulièrement crucial pour le calcul du taux d'erreurs (en anglais, bit error rate, ou BER) pour des communications optiques est la construction d'un diagramme de l'œil du signal à surveiller. En collaboration avec George Moustakides (action IRIS), et dans le cadre du stage de DEA d'Amadou Sall, nous avons pu tester la méthode précédemment développée sur de vraies données mesurées à partir d'un montage expérimental fait à Alcatel Marcoussis. Nous avons pu montrer que le BER calculé par notre logiciel à partir des données échantillonnées est très proche, dans diverses configurations, en présence d'un filtre électrique adapté, du taux effectivement mesuré lors de l'expérience. Pour ce qui est de l'émulation logicielle du filtre électrique, nous avons obtenu également de bon résultats sur des données réelles, mais seulement dans le cas où il n'y a pas ou peu d'interférence entre symboles. D'autres expériences seront nécessaires pour aller plus loin.

Sont toujours en cours des travaux visant à rendre plus robuste le calcul du BER, notamment en se passant de l'algorithme EM qui nécessite une initialisation assez fine, ainsi que sur le diagnostic de diverses causes de dégradation.

7.9 Optimisation de l'isolation entre faisceaux — Contrat Alcatel Espace

Contrat université de Rennes 1 UTP/04.02 — novembre 2001/avril 2002.

Participants : Jean-Jacques Fuchs, Frédéric Cérou.

La formation de faisceaux par le calcul (FFC) est une façon efficace d'augmenter le débit d'une antenne de satellite de télécommunications. Elle rend notamment possible l'attribution de la même bande de fréquences à différents faisceaux en permettant le rejet des interférences par un choix judicieux des pondérations appliquées aux sorties des capteurs. L'objectif de l'étude est d'améliorer l'isolation entre les faisceaux d'une antenne de satellite de communications avec réflecteur, en adaptant au cours du

temps les pondérations pour compenser les écarts au mode de fonctionnement nominal, dus notamment aux déformations du réflecteur et aux dérives des capteurs.

Nous avons développé un algorithme d'optimisation qui permet de calculer des pondérations nominales particulièrement robustes satisfaisant les spécifications. Nous avons mis en évidence que les mesures disponibles actuellement dans ce type d'équipement ne permettent pas d'adapter les pondérations pour remédier aux effets des déformations et des dérives sortant du domaine de robustesse. L'introduction de sources coopérantes au sol et de mesures plus complètes au niveau des capteurs semble indispensable pour passer de pondérations robustes à des pondérations adaptatives dans ce problème du type «séparation de sources».

8 Actions régionales, nationales et internationales

8.1 Chaînes de Markov cachées et filtrage particulière — Action Math–STIC

Participants : Fabien Campillo, Natacha Caylus, Frédéric Cérou, Arnaud Guyader, François Le Gland, Laurent Mevel.

F. Le Gland est co–animateur avec Éric Moulines (ENST Paris) du projet «Chaînes de Markov cachées et filtrage particulière», qui a démarré en décembre 2001 dans le cadre du programme inter–départements Math–STIC du CNRS. Les activités suivantes ont été organisés pour l'animation de la communauté autour de cette thématique :

- deux journées de lancement à l'ENST Paris en janvier,
- une session invitée aux journées du groupe MAS de la SMAI à Grenoble en septembre,
- enfin, deux journées thématiques dans le cadre du GdR–PRC ISIS à Paris en décembre.

Les unités du CNRS participant à cette action sont le LSP à Toulouse, le CEREMADE à Paris, le laboratoire de Mathématique d'Orsay, le LMC / IMAG à Grenoble, le LTCI / ENST Paris, et l'IRISA (projets SIGMA2 et VISTA).

8.2 Méthodes particulières (AS67) — Action spécifique du département STIC

Participants : Fabien Campillo, Natacha Caylus, Frédéric Cérou, Arnaud Guyader, François Le Gland, Laurent Mevel.

F. Le Gland est co–animateur avec Olivier Cappé (ENST Paris) de l'action spécifique «Méthodes particulières» du département STIC du CNRS, qui a démarré en septembre dans le cadre du RTP24 «Mathématiques de l'Information et des Systèmes». Les acteurs de cette action spécifique sont regroupés autour de quatre pôles : (i) le LTCI / ENST Paris, le CMAP / École Polytechnique et le CEREMADE à Paris, (ii) l'IRISA et le LSP à Toulouse, (iii) le LMC / IMAG à Grenoble et (iv) le département d'engineering de l'université de Cambridge (CUED), Microsoft Research à Cambridge, le département de mathématiques de l'université de Bristol et l'IRCCYN à Nantes.

8.3 Identification des systèmes — Réseau TMR SI

Contrat université de Rennes 1 MW 33 — mars 1998/février 2003.

Participants : Jean–Jacques Fuchs, Michèle Basseville, Albert Benveniste, Éric Fabre, François Le Gland, Laurent Mevel, Qinghua Zhang.

Le projet SIGMA2 participe au réseau européen SI «System Identification» qui regroupe neuf équipes de recherche européennes : CWI (coordinateur, Pays–Bas), Technische Universität Wien (Autriche), université catholique de Louvain (Belgique), INRIA Sophia–Antipolis et IRISA/université de Rennes 1 (France), University of Cambridge (Royaume–Uni), LADSEB/CNR et Università degli Studi di Padova (Italie), KTH et Linköpings Universitet (Suède), dans le cadre du programme TMR. Le séminaire annuel s'est tenu au Croisic du 23 au 25 septembre, et a été organisé par le projet, avec l'aide de Marie–Noëlle Georgeault et d'Elisabeth Lebet. Une réflexion prospective a été menée cette année en vue de préparer le programme scientifique de la prochaine proposition de réseau d'excellence, suite au dépôt de la déclaration d'intérêt (EoI) intitulée ERNSI+ en juin 2002. Notre contribution dans le réseau actuel concerne l'identification des systèmes hybrides, l'identification des HMM, la surveillance et le diagnostic, et les observateurs non–linéaires.

8.4 Méthodes statistiques pour les systèmes dynamiques stochastiques — Réseau IHP DYNSTOCH

Rattachement au partenaire français du réseau — septembre 2000/août 2004.

Participants : Frédéric Cérou, François Le Gland, Laurent Mevel, Bo Wang.

Nous participons au réseau européen DYNSTOCH «Statistical Methods for Dynamical Stochastic Models», qui regroupe neuf équipes de recherche européennes : Københavns Universitet (coordinateur, Danemark), Universiteit van Amsterdam (Pays–Bas), Humboldt Universität zu Berlin et Albert Ludwigs Universität Freiburg (Allemagne), Universidad Politécnica de Cartagena (Espagne), Helsingin Yliopisto (Finlande), University College London (Royaume–Uni), LADSEB/CNR (Italie), université de Paris VI (France), dans le cadre du programme IHP. Le séminaire annuel s'est tenu à La Manga del Mar Menor (Espagne) du 19 au 21 mai. Notre contribution au sein de l'équipe française de ce réseau, dont le partenaire officiel est le laboratoire de Probabilités et Modèles Aléatoires (PMA) de l'université de Paris VI, concerne la statistique asymptotique des HMM (à espace d'état fini ou continu).

8.5 Visites, et invitations de chercheurs

Le projet a accueilli Pierre Del Moral, CR CNRS au Laboratoire de Statistique et Probabilités de l'université Paul Sabatier, du 4 au 8 février, et Subhrakanti Dey, senior lecturer au Department of Electrical and Electronic Engineering de l'université de Melbourne les 15 et 16 juillet.

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), et membre du comité de pilotage du RTP24 «Mathématiques de l'information et des systèmes». Elle est co–responsable du comité technique IFAC IAF–TC «Fault Detection, Supervision and Safety of Technical Processes», relevant du comité de coordination IA–CC «Industrial Applications», et membre du

comité technique SSM–TC «Modelling, Identification and Signal Processing», relevant du comité de coordination SSM–CC «Systems and Signals». Elle est éditeur associé du journal IFAC «Automatica», et du journal «Mechanical Systems and Signal Processing». Elle est membre des comités internationaux de programme de Safeprocess'03, Sysid'03 et ECC'03. Elle a été sollicitée pour l'évaluation de deux «Discovery Projects» soumis à l'ARC (Australian Research Council), secteur «Mathematics, Information and Communications».

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 membre du comité technique IEEE SAM «Sensor Array and Multichannel». Il est membre des comités internationaux de programme du second workshop IEEE «Sensor Array and Multichannel Signal Processing» qui s'est tenu à Rosslyn, Virginia du 4 au 6 août 2002, et d'EUSIPCO qui s'est tenu à Toulouse du 3 au 6 septembre 2002.

É. Fabre et A. Roumy ont co-organisé une journée thématique du GdR–PRC ISIS (thème D) sur les «méthodes turbo», en avril.

F. Le Gland est co-animateur d'une action Math–STIC et de l'action spécifique AS67 du département STIC du CNRS, consacrées au filtrage particulière, voir modules 8.1 et 8.2. Il a co-organisé avec J.–P. Le Cadre (projet VISTA) des journées thématiques du GdR–PRC ISIS sur le «filtrage particulière», en décembre.

Q. Zhang est co-animateur de la communauté «Sûreté, Supervision, Surveillance» (S3), qui regroupe des laboratoires français intéressés par les problèmes de sûreté de fonctionnement. Il participe à l'action spécifique AS10 du département STIC du CNRS, consacrée aux nouveaux domaines et aux nouveaux défis en automatique, animée par Pierre Bernhard et Ioan–Doré Landau, dans un sous-groupe animé par Gildas Besançon, et portant sur l'estimation des grandeurs non mesurées dans les systèmes dynamiques.

J. Palicot a été éditeur invité, en collaboration avec Tim Hentschel d'un double numéro spécial des Annales des Télécommunications, consacrés à la radio logicielle : le premier, sous-titré «L'évolution des techniques» (tome 57, numéro 5-6, mai / juin 2002) et le second, sous-titré «Des techniques aux réalisations» (tome 57, numéros 7/8, juillet/août 2002). Ces deux numéros spéciaux seront de plus édités sous la forme d'un livre à paraître fin 2002. Il a coordonné deux journées thématiques du GdR–PRC ISIS (thème D), l'une sur la «radio logicielle» en avril, et la seconde sur la «radio cognitive» en novembre. Il participe activement aux trois sous-projets de l'action spécifique AS37 du département STIC du CNRS, consacrée à la radio logicielle, animée par Pierre Duhamel et Jean François Héliard. Dans le sous-projet 1, il est responsable de la rédaction du chapitre décrivant les architectures radio logicielles, les partenaires étant le CNAM, le L2MP et l'IRCCyN. Dans le sous-projet 2, il participe aux chapitres consacrés au «Digital Front End» et à la modulation, les partenaires étant l'IRCCyN, l'ETIS et l'IETR. Dans le sous-projet 3, il est responsable de la rédaction du chapitre décrivant la «radio cognitive».

9.2 Enseignement

Le projet intervient de façon importante dans le DEA–STIR (Signal, Télécommunications, Images, Radar) de l'école doctorale MATISSE, université de Rennes 1 : 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».

M. Basseville enseigne les «Méthodes statistiques pour la surveillance en fonctionnement» dans le cadre du module «Outils d'aide au diagnostic», de l'option «Automatique et Informatique Industrielle», de la dernière année de l'École des Mines de Nantes.

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

Q. Zhang enseigne la «Modélisation boîte-noire» à l'Institut National d'Horticulture d'Angers.

J. Palicot a coordonné une session de formation de l'ENST Paris sur le thème de la «radio logicielle» en décembre.

9.3 Participation à des colloques, séminaires, cours, etc.

M. Basseville a été sollicitée pour rédiger un article de synthèse, qui a fait l'objet d'un exposé tutoriel dans une session invitée sur le diagnostic au congrès mondial IFAC [22]. Cet article a ensuite été sollicité pour soumission au journal IFAC «Annual Reviews in Control» [4].

Outre les communications faisant l'objet d'une publication dans les actes, et qui sont listées en fin de document, les membres de l'équipe ont effectué les présentations suivantes.

A. Benveniste a donné une conférence invitée au colloque MOVEP'2002, à Nantes en juin, sur le diagnostic distribué et l'application à la gestion distribuée d'alarmes.

É. Fabre a donné un exposé sur des techniques de décodage conjoint source-canal par des méthodes turbo, lors de la journée thématique du GdR-PRC ISIS qu'il a organisée avec A. Roumy sur les «méthodes turbo» en avril. Il a également donné un exposé sur les turbo-codes au séminaire de l'antenne rennaise de l'ENS Cachan, en octobre.

A. Roumy a été invitée à présenter ses travaux communs avec S. Verdú au sujet de la conception de turbo-codes, à l'institut Eurecom, Sophia, en mars.

S. Haar a présenté des travaux communs avec A. Benveniste et É. Fabre sur la probabilisation des dépliages au congrès «Stochastik-Tage» à Magdeburg en mars.

Lors du workshop annuel du réseau TMR ERNSI, voir module 8.3, qui a eu lieu à Ports-aux-Rocs en septembre, M. Basseville a donné un exposé sur l'identification, la détection et la localisation de dommages, par des méthodes de sous-espaces, A. Benveniste a donné un exposé sur le diagnostic des SED distribués et asynchrones, et Q. Zhang a donné un exposé sur les observateurs non-linéaires adaptatifs.

F. Le Gland a donné des exposés sur l'approximation particulière des mesures signées et leur utilisation en statistique, aux journées de démarrage du projet Math-STIC «Chaînes de Markov cachées et filtrage particulière» à l'ENST en janvier, au groupe de travail du projet MATHFI à l'ENPC en mars, et dans la session «Méthodes de Monte Carlo et filtrage particulière» des journées du groupe MAS de la SMAI à Grenoble en septembre.

J. Palicot a donné un exposé invité sur l'intérêt des techniques de paramétrisation pour des architectures radio logicielle reconfigurables, aux journées francophones «Adéquation Algorithme Architecture» à Monastir (Tunisie) en décembre.

Q. Zhang a donné deux exposés sur l'approche locale pour la détection et la localisation de pannes, et sur les observateurs adaptatifs pour la détection et la localisation de pannes, au workshop «Fault Detection and Isolation in Nonlinear Systems» qui a précédé IFAC World Congress à Barcelone en juillet.

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* 8, 2 (Special issue on Hybrid Systems), juin 1998, p. 203–231.
- [2] M. BASSEVILLE, I. V. 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] M. BASSEVILLE, « On-board component fault detection and isolation using the statistical local approach », *Automatica* 34, 11, novembre 1998, p. 1391–1416.
- [4] A. BENVENISTE, B. C. LÉVY, 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.
- [5] A. BENVENISTE, M. MÉTIVIER, P. PRIOURET, *Adaptive Algorithms and Stochastic Approximations, Applications of Mathematics*, 22, Springer Verlag, New York, 1990.
- [6] 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* 13, 1, 2000, p. 41–62.
- [7] F. LE GLAND, L. MEVEL, « Exponential forgetting and geometric ergodicity in hidden Markov models », *Mathematics of Control, Signals, and Systems* 13, 1, 2000, p. 63–93.
- [8] Q. ZHANG, M. BASSEVILLE, A. BENVENISTE, « Early warning of slight changes in systems », *Automatica* 30, 1 (Special issue on Statistical Methods in Signal Processing and Control), janvier 1994, p. 95–113.

Thèses et habilitations à diriger des recherches

- [9] A. CLAVEL, *Modélisation et identification paramétrique de systèmes hystérétiques. Application à la suspension des véhicules routiers*, Thèse de doctorat, université de Rennes 1, mars 2002, <ftp://ftp.irisa.fr/techreports/theses/2002/clavel.ps.gz>.
- [10] A. GUYADER, *Contribution aux algorithmes de décodage pour les codes graphiques*, Thèse de doctorat, université de Rennes 1, avril 2002, <ftp://ftp.irisa.fr/techreports/theses/2002/guyader.ps.gz>.
- [11] A. XU, *Observateurs adaptatifs non-linéaires et diagnostic de pannes*, Thèse de doctorat, université de Rennes 1, septembre 2002, <ftp://ftp.irisa.fr/techreports/theses/2002/xu.ps.gz>.

Articles et chapitres de livre

- [12] M. BASSEVILLE, I. NIKIFOROV, « Fault isolation for diagnosis : nuisance rejection and multiple hypotheses testing », *Annual Reviews in Control* 26, 2, décembre 2002, p. 189–202.
- [13] M. BASSEVILLE, « Statistical methods for change detection », in : *Encyclopedia of Life Support Systems (EOLSS)*, EOLSS Publishers, Oxford, 2002.
- [14] F. CAMPILLO, A. LEJAY, « A Monte Carlo method without grid for a fractured porous domain model », *Monte Carlo Methods and Applications* 8, 2, 2002, p. 129–148.
- [15] F. CAMPILLO, A. PIATNITSKI, « Effective diffusion in vanishing viscosity », in : *Nonlinear Partial Differential Equations and their Applications, Séminaire au Collège de France, XIV*, D. Cioranescu et J.-L. Lions (éditeurs), *Studies in Mathematics and Applications*, 31, North-Holland, Amsterdam, 2002, p. 133–145.

- [16] B. GAUJAL, S. HAAR, J. MAIRESSE, « Blocking a transition in a free choice net, and what it tells about its throughput », *Journal of Computer and System Sciences*, à paraître.
- [17] S. HAAR, « Probabilistic unfoldings and partial order fairness in Petri nets », in : *Process Algebra and Probabilistic Methods. Performance Modeling and Verification (PAPM-PROBMIV)*, Copenhagen, H. Hermanns et R. Segala (éditeurs), *Lecture Notes in Computer Science*, 2399, Springer Verlag, Berlin, 2002, p. 95–114.
- [18] M. JOANNIDES, F. LE GLAND, « Small noise asymptotics of the Bayesian estimator in nonidentifiable models », *Statistical Inference for Stochastic Processes* 5, 1, 2002, p. 95–130.
- [19] F. LE GLAND, N. OUDJANE, « A robustification approach to stability and to uniform particle approximation of nonlinear filters : the example of pseudo-mixing signals », *Stochastic Processes and their Applications*, à paraître.
- [20] F. LE GLAND, N. OUDJANE, « Stability and uniform approximation of nonlinear filters using the Hilbert metric, and application to particle filters », *The Annals of Applied Probability*, à paraître.
- [21] F. LE GLAND, B. WANG, « Asymptotic normality in partially observed diffusions with small noise : application to FDI », in : *Workshop on Stochastic Theory and Control, University of Kansas 2001. In honor of Tyrone E. Duncan on the occasion of his 60th birthday*, B. Pasik-Duncan (éditeur), *Lecture Notes in Control and Information Sciences*, 280, Springer Verlag, Berlin, 2002, p. 267–282.
- [22] L. MEVEL, M. BASSEVILLE, A. BENVENISTE, M. GOURSAT, « Merging sensor data from multiple measurement setups for nonstationary subspace-based modal analysis », *Journal of Sound and Vibration* 249, 4, janvier 2002, p. 719–741.
- [23] L. MEVEL, A. BENVENISTE, M. BASSEVILLE, M. GOURSAT, « Blind subspace-based eigenstructure identification under nonstationary excitation using moving sensors », *IEEE Transactions on Signal Processing SP-50*, 1, janvier 2002, p. 41–48.
- [24] L. MEVEL, M. GOURSAT, M. BASSEVILLE, « Stochastic subspace-based structural identification and damage detection — Application to the steel-quake benchmark », *Mechanical Systems and Signal Processing* 17, 1 (Special issue on COST F3 Benchmarks), janvier 2003, p. 91–101.
- [25] L. MEVEL, M. GOURSAT, M. BASSEVILLE, « Stochastic subspace-based structural identification and damage detection and localization — Application to the Z24 bridge benchmark », *Mechanical Systems and Signal Processing* 17, 1 (Special issue on COST F3 Benchmarks), janvier 2003, p. 143–151.
- [26] J. PALICOT, C. ROLAND, « La radio logicielle : enjeux, contraintes et perspectives », *Revue de l'Électricité et de l'Électronique*, 11 / 2001, décembre 2001.
- [27] C. ROLAND, J. PALICOT, « A self-adaptive universal receiver », *Annales des Télécommunications* 57, 5–6, mai / juin 2002, p. 421–456.
- [28] Q. ZHANG, « Adaptive observer for MIMO linear time varying systems », *IEEE Transactions on Automatic Control AC-47*, 3, mars 2002, p. 525–529.

Communications à des congrès, colloques, etc.

- [29] M. BASSEVILLE, L. MEVEL, « Output-only stochastic subspace-based structural identification and damage detection and localization », in : *1st European Workshop on Structural Health Monitoring*, Cachan, juillet 2002.
- [30] M. BASSEVILLE, I. NIKIFOROV, « Fault isolation for diagnosis : nuisance rejection and multiple hypotheses testing », in : *15th IFAC World Congress, Barcelona*, IFAC, juillet 2002.
- [31] A. BENVENISTE, E. FABRE, C. JARD, S. HAAR, « Diagnosis of asynchronous discrete event systems, a net unfolding approach », in : *Workshop on Discrete Event Systems (WODES)*, Zaragoza, octobre 2002.

- [32] K. BERBERIDIS, A. MARAVA, P. KARAIVAZOGLU, J. PALICOT, « Robust and fast converging decision feedback equalizer based on a new adaptive semi-blind estimation algorithm », in : *IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM)*, San Antonio, IEEE Communications Society, novembre 2001.
- [33] G. BESANÇON, Q. ZHANG, « Further developments on adaptive observers for nonlinear systems with application in fault detection », in : *15th IFAC World Congress, Barcelona*, IFAC, juillet 2002.
- [34] E. FABRE, A. BENVENISTE, C. JARD, « Distributed diagnosis for large discrete event dynamic systems », in : *15th IFAC World Congress, Barcelona*, IFAC, juillet 2002.
- [35] E. FABRE, V. PIGOURIER, « Monitoring distributed systems with distributed algorithms », in : *41st IEEE Conference on Decision and Control (CDC)*, Las Vegas, IEEE Control Systems Society, décembre 2002.
- [36] E. FABRE, « Compositional models of distributed and asynchronous dynamical systems », in : *41st IEEE Conference on Decision and Control (CDC)*, Las Vegas, IEEE Control Systems Society, décembre 2002.
- [37] J.-J. FUCHS, B. DELYON, « Min-max interpolators and Lagrange interpolation formula », in : *IEEE International Symposium on Circuits and Systems (ISCAS)*, Scottsdale, Volume IV, IEEE Circuits and Systems Society, p. 429–432, mai 2002.
- [38] J.-J. FUCHS, « New windows for tunable length FIF filter design », in : *27th IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing (ICASSP)*, Orlando, Volume II, IEEE Signal Processing Society, p. 1521–1524, mai 2002.
- [39] A. GOUPIL, J. PALICOT, « Constant norm algorithm class », in : *11th European Signal Processing Conference (EUSIPCO)*, Toulouse, I, EURASIP, p. 641–644, septembre 2002.
- [40] A. GUYADER, L. MEVEL, « Covariance-driven subspace methods : input/output vs. output-only », in : *21st International Modal Analysis Conference (IMAC-XXI)*, Kissimmee, SEM, Inc., février 2003.
- [41] S. HAAR, L. KAISER, F. SIMONOT-LION, J. TOUSSAINT, « Equivalence between timed state machines and time Petri nets », in : *Workshop on Discrete Event Systems (WODES)*, Zaragoza, octobre 2002.
- [42] S. HAAR, « Probabilizing parallelism in cluster unfoldings », in : *Workshop on Concurrency, Specification and Programming (CS&P)*, Berlin, octobre 2002.
- [43] L. MEVEL, M. BASSEVILLE, M. GOURSAT, A. HASSIM, « A subspace detection approach to damage localization », in : *21st International Modal Analysis Conference (IMAC-XXI)*, Kissimmee, SEM, Inc., février 2003.
- [44] L. MEVEL, M. GOURSAT, M. BASSEVILLE, A. BENVENISTE, « Steelquake modes and modeshapes identification from multiple sensor pools », in : *20th International Modal Analysis Conference (IMAC-XX)*, Los Angeles, SEM, Inc., février 2002.
- [45] L. MEVEL, M. GOURSAT, A. BENVENISTE, « Using subspace on flight data, a practical example », in : *21st International Modal Analysis Conference (IMAC-XXI)*, Kissimmee, SEM, Inc., février 2003.
- [46] G. V. MOUSTAKIDES, F. CÉROU, O. AUDOUIN, L. NOIRIE, « Eye diagram reconstruction using asynchronous imperfect sampling, application to BER estimation for fiber-optic communication systems », in : *11th European Signal Processing Conference (EUSIPCO)*, Toulouse, III, EURASIP, p. 375–378, septembre 2002.
- [47] L. NOIRIE, F. CÉROU, G. V. MOUSTAKIDES, O. AUDOUIN, P. PELOSO, « New transparent optical monitoring of the eye and BER using asynchronous under-sampling of the signal », in : *European Conference on Optical Communications (ECOC)*, Copenhagen, septembre 2002. Post-deadline paper.
- [48] J. PALICOT, A. GOUPIL, « Quasi-Newton formulation and analysis of split LMS », in : *14th International Conference on Digital Signal Processing (DSP)*, Santorin, juillet 2002. Paper M4B.5.
- [49] J. PALICOT, C. ROLAND, « Some theoretical limits for a blind identification of the telecommunication standard in use with RBF neural networks », in : *2nd Workshop on Software Radios (WSR)*, Karlsruhe, mars 2002.

- [50] G. RIGATOS, Q. ZHANG, « Fuzzy model validation using the local statistical approach », in : *IEEE Conference on Systems, Man and Cybernetics (SMC), Hammamet*, IEEE Control Systems, Man and Cybernetics Society, octobre 2002.
- [51] A. A. RONTOGIANNIS, K. BERBERIDIS, A. MARAVA, J. PALICOT, « Semi-blind estimation of multi-path channel parameters via a separable least-squares approach », in : *14th International Conference on Digital Signal Processing (DSP), Santorin*, juillet 2002. Paper M1A.4.
- [52] A. XU, Q. ZHANG, « Fault detection and isolation based on adaptive observers for linear time varying systems », in : *15th IFAC World Congress, Barcelona*, IFAC, juillet 2002.
- [53] A. XU, Q. ZHANG, « State and parameter estimation for nonlinear systems », in : *15th IFAC World Congress, Barcelona*, IFAC, juillet 2002.

Rapports de recherche et publications internes

- [54] M. BASSEVILLE, L. MEVEL, M. GOURSAT, « Statistical model-based damage detection and localization : subspace-based residuals and damage-to-noise sensitivity ratios », *Publication Interne n°1470*, IRISA, novembre 2002, <ftp://ftp.irisa.fr/techreports/2002/PI-1470.ps.gz>.
- [55] M. BASSEVILLE, I. NIKIFOROV, « Fault isolation for diagnosis : nuisance rejection and multiple hypotheses testing », *Publication Interne n°1452*, IRISA, avril 2002, <ftp://ftp.irisa.fr/techreports/2002/PI-1452.ps.gz>.
- [56] A. BENVENISTE, E. FABRE, C. JARD, S. HAAR, « Diagnosis of asynchronous discrete event systems, a net unfolding approach », *Publication Interne n°1456 (update of 1399)*, IRISA, mai 2002, <ftp://ftp.irisa.fr/techreports/2002/PI-1456.ps.gz>.
- [57] F. CÉROU, P. DEL MORAL, F. LE GLAND, P. LÉZAUD, « Genetic genealogical models in rare event analysis », *Publication du Laboratoire de Statistique et Probabilités*, Université Paul Sabatier, Toulouse, 2002.
- [58] F. CÉROU, P. DEL MORAL, F. LE GLAND, « On genealogical trees and Feynman-Kac models in path space and random media », *Publication du Laboratoire de Statistique et Probabilités*, Université Paul Sabatier, Toulouse, 2002.
- [59] S. HAAR, « Probabilistic cluster unfoldings for Petri nets », *Publication Interne n°1428*, IRISA, avril 2002, <ftp://ftp.irisa.fr/techreports/2002/PI-1428.ps.gz>.
- [60] F. LE GLAND, N. OUDJANE, « A robustification approach to stability and to uniform particle approximation of nonlinear filters : the example of pseudo-mixing signals », *Publication Interne n°1451*, IRISA, mars 2002, <ftp://ftp.irisa.fr/techreports/2002/PI-1451.ps.gz>.