

# *Projet SIGMA2*

*Signaux, modèles et algorithmes*

*Rennes*

THÈME 4A



*R*apport  
*d'Activité*

2001



## Table des matières

<b>1</b>	<b>Composition de l'équipe</b>	<b>3</b>
<b>2</b>	<b>Présentation et objectifs généraux</b>	<b>4</b>
<b>3</b>	<b>Fondements scientifiques</b>	<b>5</b>
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 . . .	9
3.3	Modèles partiellement stochastiques pour la surveillance des systèmes distribués	13
<b>4</b>	<b>Domaines d'applications</b>	<b>16</b>
4.1	Analyse de structures vibrantes en ambiance de travail . . . . .	16
4.2	Télécommunications : diagnostic de pannes en gestion de réseaux, turbo-codes, décodage conjoint source-canal . . . . .	17
<b>5</b>	<b>Logiciels</b>	<b>19</b>
5.1	Nonlinear Modelling Matlab Toolbox . . . . .	19
<b>6</b>	<b>Résultats nouveaux</b>	<b>20</b>
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 . . . . .	23
6.4	Approche statistique pour la validation de modèles flous . . . . .	23
6.5	Surveillance des modèles de Markov cachés, et filtrage particulaire . . . . .	24
6.6	Surveillance des systèmes distribués . . . . .	26
6.7	Codes correcteurs et modèles graphiques . . . . .	28
6.8	Surveillance de la qualité de service dans un réseau optique . . . . .	29
6.9	Synthèse de filtres numériques . . . . .	30
6.10	Analyse de données textuelles . . . . .	31
<b>7</b>	<b>Contrats industriels (nationaux, européens et internationaux)</b>	<b>33</b>
7.1	Analyse de structures vibrantes — Projets Eurêka SINOPSYS et FLITE . . . . .	33
7.2	Diagnostic de pannes dans les réseaux de télécommunications — Projets RNRT exploratoires MAGDA et MAGDA2 . . . . .	34
7.3	Transmission robuste de vidéo vers les mobiles — Projet RNRT précompétitif VIP	35
7.4	Diagnostic optique transparent — Contrat Alcatel . . . . .	35
7.5	Identification du comportement dynamique d'un véhicule routier — Contrat Renault . . . . .	36
7.6	Modélisation et diagnostic de pannes dans des organes de véhicules automobiles à basse consommation — Contrat Renault . . . . .	36

<b>8</b>	<b>Actions régionales, nationales et internationales</b>	<b>37</b>
8.1	Identification des systèmes — Réseau TMR SI . . . . .	37
8.2	Méthodes statistiques pour les systèmes dynamiques stochastiques — Réseau IHP DYNSTOCH . . . . .	37
8.3	Autres actions internationales . . . . .	37
8.4	Visites, et invitations de chercheurs . . . . .	37
<b>9</b>	<b>Diffusion de résultats</b>	<b>38</b>
9.1	Animation de la communauté scientifique . . . . .	38
9.2	Enseignement . . . . .	38
9.3	Participation à des colloques, séminaires, cours, etc. . . . .	39
<b>10</b>	<b>Bibliographie</b>	<b>39</b>

# 1 Composition de l'équipe

## Responsable scientifique

François Le Gland [DR INRIA]

## Assistante de projet

Marie-Noëlle Georgeault [TR INRIA, jusqu'au 28 février et depuis le 1<sup>er</sup> novembre 2001]

Christèle Soulas [du 1<sup>er</sup> février au 31 octobre 2001]

## Personnel INRIA

Albert Benveniste [DR, à temps partiel]

Frédéric Cérou [CR]

Éric Fabre [CR]

Stefan Haar [CR depuis le 1<sup>er</sup> septembre 2001]

Laurent Mevel [CR]

George Moustakides [DR depuis le 1<sup>er</sup> septembre 2001]

Aline Roumy [CR depuis le 15 novembre 2001]

Qinghua Zhang [CR, puis DR à compter du 1<sup>er</sup> septembre 2001]

## Personnel CNRS

Michèle Basseville [DR]

## Personnel université de Rennes 1

Jean-Jacques Fuchs [professeur]

Annie Morin [maître de conférences]

## Collaborateurs extérieurs

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

Arnaud Guyader [ATER à l'université de Rennes 2 depuis le 1<sup>er</sup> octobre 2001]

## Spécialiste industriel

Jacques Palicot [depuis le 1<sup>er</sup> novembre 2001]

## Ingénieur expert INRIA

Yann Veillard [depuis le 1<sup>er</sup> décembre 2001]

## Ingénieur associé

Vincent Pigourier

## Chercheurs doctorants

Samy Abbes [bourse MENRT, coopérant scientifique depuis le 1<sup>er</sup> mars 2001]

Arnaud Clavel [bourse Cifre Renault]

Xenofon Doukopoulos [bourse réseau TMR depuis le 1<sup>er</sup> novembre 2001]

Arnaud Guyader [bourse MENRT jusqu'au 30 septembre 2001]

Olivier Perrin [bourse Cifre Renault]

Rodolphe Priam [bourse MENRT]

Aiping Xu [bourse INRIA]

## Chercheurs post-doctorants INRIA

Stefan Haar [du 1<sup>er</sup> février au 31 août 2001]

Bo Wang [depuis le 1<sup>er</sup> septembre 2001]

## Chercheurs post-doctorants université de Rennes 1

Bo Wang [jusqu'au 31 août 2001]

Gerasimos Rigatos

**Chercheur invité**

George Moustakides [université de Patras, jusqu'au 28 février 2001]

**2 Présentation et objectifs généraux**

**Mots clés** : identification, surveillance, diagnostic, méthode de sous-espace, approche locale, HMM, filtrage particulière, système distribué, système à événements 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.

Plusieurs nouveaux projets ou avant-projets seront prochainement (ou sont déjà) créés, qui accueilleront les activités de recherche dans les domaines suivants :

- traitement de la parole et du signal audio (projet METISS, créé en octobre 2001, avant-projet depuis janvier 2001),
- traitement du signal pour les communications numériques et optiques (suite au recrutement de George Moustakides, de Jacques Palicot et d'Aline Roumy cette année),
- analyse de données textuelles (action TEXMEX, créée en janvier 2002).

**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,
- 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 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), au niveau européen sur l'identification des systèmes (TMR), sur la dynamique des structures (COST), 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 <sup>[Rou72, Le 86]</sup>, et que nous avons étendue et adaptée [5, 2], permet de fonder une telle démarche [3, 8].*

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  $\theta_0$  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 :

- 
- [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.

- le nouvel échantillon correspond-il toujours à  $\mathbb{P}_{\theta_0}$  ? (il s'agit de savoir si l'échantillon observé est bien en conformité avec le modèle nominal),
- sinon, quelles sont les composantes du paramètre  $\theta$  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  $\theta$  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  $\Delta$  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  $\theta_0$  fixé). Si la matrice  $M_N = -\mathbb{E}_{\theta_0}[U'_N(\theta_0)]$ , qui est aussi la dérivée au point  $\theta_0$  de l'application  $\theta \mapsto \mathbb{E}_\theta[U_N(\theta_0)]$ , converge vers une limite  $M$ , alors le théorème-limite central montre <sup>[DJB97]</sup> que le résidu est asymptotiquement gaussien

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

où la matrice de covariance asymptotique  $\Sigma$  peut être évaluée ou estimée [8]. Décider entre  $\Delta = 0$  et  $\Delta \neq 0$  dans le modèle «limite» se traduit par le test du  $\chi^2$  suivant (en supposant que  $M$  est de rang plein et  $\Sigma$  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  $\Sigma$  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.

---

[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** En supposant pour simplifier que la question «quel type de panne a eu lieu» puisse se réduire à la question «quelle composante du vecteur  $\theta$  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  $\Delta$ , 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  $\bar{\zeta} = M^T \Sigma^{-1} \zeta_N$

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

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  $\Delta_b$  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  $b$ .

**Diagnostic physique** Cette approche permet également de réaliser un diagnostic physique, c'est-à-dire en termes d'un paramètre  $\phi$  ayant une signification physique (plutôt qu'en termes du paramètre  $\theta$  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  $\phi_0$  de l'application  $\phi \mapsto \theta(\phi)$ , et de mettre en œuvre la procédure de diagnostic sur les composantes du paramètre  $\phi$ .

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 particulière

**Mots clés :** HMM, statistique asymptotique, stabilité exponentielle, filtrage particulière.

### 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 particulière** 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 particuliers, 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 [6, 7], 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] [45], de façon à pouvoir considérer des situations générales où l'espace d'état est non-compact.

**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

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

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 <sup>[JL95]</sup>,
  - 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 [16] 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, voir module 6.5, nous avons montré que (i) la famille paramétrée des distributions de probabilités des observations vérifie la propriété de normalité asymptotique locale <sup>[Le 86]</sup>, 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 une v.a. gaussienne centrée, de matrice de covariance  $\mathcal{I}$ .

**Filtrage particulière** 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 <sup>[CL89]</sup> associés au calcul

- 
- [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.
- [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.

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 particulière, 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 <sup>[DM00a]</sup>, et de nombreux aspects théoriques et pratiques sont abordés dans l'ouvrage collectif <sup>[DdG01]</sup>.

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 <sup>[GSS93]</sup>, 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. Sous une hypothèse naturelle et peu restrictive, nous avons montré que le filtre optimal linéarisé tangent est une mesure signée de masse nulle, absolument continue par rapport au filtre optimal <sup>[CL00]</sup> [12]. De la même façon, on peut montrer que le filtre associé au calcul récursif d'espérances conditionnelles de FA de l'état caché est une mesure éventuellement signée, absolument continue par rapport au filtre optimal <sup>[Cap01]</sup>. Il est alors naturel d'approcher ces filtres dérivés à l'aide du même système de particules déjà utilisé pour approcher le filtre optimal, et d'affecter chaque particule d'un poids éventuellement signé, représentatif de la densité du filtre dérivé par rapport au filtre optimal. D'autres méthodes particulières pour l'approximation des mesures signées font également l'objet de recherches actives.

Pour étudier l'erreur d'approximation des algorithmes ainsi obtenus quand le nombre de

- 
- [DM00a] 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), 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.
  - [CL00] F. CÉROU, F. LE GLAND, « Efficient particle filters for residual generation in partially observed SDE's », *in: Proceedings of the 39th Conference on Decision and Control, Sydney 2000*, IEEE–CSS, p. 1200–1205, décembre 2000.
  - [Cap01] O. CAPPÉ, « Recursive computation of smoothed functionals of hidden Markovian processes using a particle approximation », *Monte Carlo Methods and Applications 7*, 1–2, 2001, p. 81–92.

particules tend vers l'infini, la première étape consiste, comme dans l'approximation particulière du filtre optimal [45], 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 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'algorithmique de diagnostic, ou d'observation d'état, afin de ne plus manipuler*

- 
- [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.

*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.*

*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'algorithmique 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 [4].

L'idée de ce modèle est simple : 1) pour chaque place sujette à conflit (amont et/ou aval), le choix est probabilisé isolément, 2) on considère l'ensemble de ces places, muni de la loi produit (elles sont alors indépendantes), 3) on y adjoint les places non sujettes à conflit, 4) prenant en compte les règles de tir des RdP, on ne conserve que les séquences légales et la loi de probabilité qui en résulte est la loi produit précédemment introduite, «conditionnellement à l'ensemble des séquences légales». On montre alors qu'on a bien parfaite adéquation entre «concurrence» et «indépendance stochastique» pour un ensemble de transitions. 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 [1].

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 7.2.

## 4 Domaines d'applications

Les domaines d'application du projet sont divers, nous citons ici ceux qui ont donné ou donnent lieu à des applications avec partenaire industriel et données réelles à traiter. Ce sont : la mécanique des vibrations, 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, les problèmes d'indexation en multimedia, 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 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.

---

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

Les méthodes classiques d'analyse et de surveillance vibratoires des structures mécaniques et machines tournantes sont essentiellement dédiées au traitement de mesures prises soit sur banc d'essai, soit dans des conditions d'excitation ou de vitesse de rotation spécifiques. L'objet du projet Euréka SINOPSYS «Model Based Structural Monitoring Using in-Operation System Identification» coordonné par LMS (Leuven Measurements Systems, Leuven, Belgique) est précisément le développement et l'intégration de logiciels d'analyse et de surveillance vibratoires dédiés au traitement de mesures prises pendant le fonctionnement usuel de la structure ou machine considérée, sans excitation artificielle, ni ralentissement, ni arrêt de machine. Les projets SIGMA2 et METALAU 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.

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 données de laboratoire avec excitation mesurée, que sur données en fonctionnement sans mesurer 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'Euréka, 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, 6.6, 6.7, 7.2 et 7.4.*

**Mots clés :** réseau de télécommunication, gestion de réseau, supervision, gestion 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. Dans ce contexte, le diagnostic désigne l'interprétation des alarmes en vue des opérations de reconfiguration et de maintenance.

HMM voir module 3.2.

**Turbo-code** Codes correcteurs d'erreurs récemment 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 modulaire du réseau, dans le but de distribuer l'algorithmique de diagnostic. Ce travail se fait en collaboration avec le projet TRISKELL, et fait l'objet des projets RNRT exploratoires MAGDA et MAGDA2, voir module 7.2.

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 7.4. 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 sont aussi 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. Ce principe semble général et est actuellement exploré dans de nombreux problèmes de traitement du signal pour les télécommunications (par exemple, turbo-égalisation).

---

[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.

## 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, 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.*

**Participant** : Qinghua Zhang [correspondant].

Sur la base d'un travail conduit en coopération avec l'université de Linköping [JHB<sup>+</sup>95, SZL<sup>+</sup>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<sup>+</sup>95, SZL<sup>+</sup>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.

---

[JHB<sup>+</sup>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<sup>+</sup>95] J. SJÖBERG, Q. ZHANG, L. LJUNG, A. BENVENISTE, B. DELYON, P.-Y. GLORENNEC, H. HJALMÄRSSON, A. JUDITSKY, « Non-linear black-box modelling in system identification : a unified overview », *Automatica* 31, 12, décembre 1995, p. 1691–1724.

## 6 Résultats nouveaux

### 6.1 Observateurs adaptatifs pour la surveillance et le diagnostic

Voir module 3.1.

**Mots clés** : système linéaire variable dans le temps, système non-linéaire, observateur à grand gain, observateur adaptatif, estimation d'états et de paramètres.

**Participants** : Qinghua Zhang, Aiping Xu, Bernard Delyon, Arnaud Clavel, Olivier Perrin, Michèle Basseville.

**Observateurs adaptatifs pour des systèmes linéaires variables dans le temps** Pour estimer conjointement les variables d'état et certains des paramètres d'un système dynamique, il existe des méthodes pour la conception d'observateurs adaptatifs. Pour les systèmes linéaires, les méthodes classiques supposent l'invariance temporelle et se restreignent pour la plupart à des systèmes mono-sortie. Nous avons développé une méthode pour la conception d'observateurs adaptatifs applicable aux systèmes linéaires variables dans le temps multi-entrée multi-sortie. En plus de sa généralité, cette méthode est facile à réaliser et efficace sur le plan du calcul [39, 49]. L'algorithme a été testé sur un modèle de direction d'une automobile [38], dans le cadre de la thèse d'Arnaud Clavel.

Cette étude a aussi pour objectif de développer des résultats préliminaires pour l'étude sur des observateurs adaptatifs non-linéaires, voir ci-dessous.

**Observateurs adaptatifs pour les systèmes non-linéaires** 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, 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. La présence de variables d'état non mesurées dans un système non-linéaire rend le problème particulièrement difficile. Nous avons déjà étudié plusieurs méthodes pour résoudre ce problème, qui sont basées sur un observateur et sa dérivée par rapport au vecteur de paramètres, sur l'élimination des variables d'état [ZB99], ou sur la conception d'observateurs adaptatifs implicites [41].

À partir du résultat de l'an dernier sur la conception d'observateurs adaptatifs implicites, une méthode a été développée dans le cadre de la thèse d'Aiping Xu, pour concevoir des observateurs adaptatifs sous forme d'équations différentielles ordinaires, donc non implicites [40, 48]. Les avantages de ce nouveau résultat par rapport au précédent sont : la prise en compte d'une paramétrisation plus générale, plus de facilité pour l'implémentation, et une condition d'excitation moins exigeante. Ce nouveau résultat peut être résumé de la manière suivante. Pour une classe de systèmes non-linéaires, typiquement observables pour toute entrée, il est possible de concevoir un observateur à grand gain avec des techniques bien connues. Si des termes

---

[ZB99] Q. ZHANG, M. BASSEVILLE, « Local approach to FDI in nonlinear dynamical systems », in : *Proceedings of the 5th European Control Conference (ECC'99), Karlsruhe, 1999.*

supplémentaires avec des coefficients inconnus sont ajoutés à un tel système, notamment pour modéliser des pannes du système, alors la nouvelle méthode permet de concevoir, de manière constructive, un observateur adaptatif à convergence globale pour estimer conjointement les variables d'état et les coefficients inconnus du système. Cette méthode a été inspirée des observateurs à grand gain et de l'observateur adaptatif pour les systèmes linéaires variables dans le temps, voir ci-dessus.

## 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, polyréférence.

**Participants** : Michèle Basseville, Albert Benveniste, Laurent Mevel.

Ce travail est conduit en coopération avec Maurice Goursat du projet METALAU à Rocquencourt, dans le cadre du projet Euréka 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 consisté d'une part à conforter la validation expérimentale des méthodes d'identification et de surveillance sur deux benchmarks Européens, et d'autre part à capitaliser nos résultats théoriques et expérimentaux dans plusieurs articles acceptés par des revues majeures des différents domaines concernés : la mécanique [9, 17] et le traitement de signal [18], après l'automatique [BAB00].

**Identification aveugle de la structure propre d'un système linéaire sous excitation non-stationnaire par fusion de données de capteurs mobiles** Nous avons contribué à faire la preuve de la pertinence et de la consistance des algorithmes d'identification par sous-espaces pour l'identification aveugle de la structure propre d'un système linéaire soumis à une excitation non contrôlée, non mesurée et non-stationnaire. Une question non triviale dans ce contexte, et qui se pose fréquemment dans le domaine de l'analyse modale, est celle

---

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

du traitement conjoint de signaux enregistrés à des moments différents, et sous excitations différentes, autrement dit de la fusion de données mesurées par des jeux de capteurs dont certains sont mobiles. Exploitant la propriété de factorisation de la matrice de Hankel empirique qui est au coeur des méthodes sous-espaces, nous avons proposé une solution originale au problème de fusion, qui procède par normalisation non triviale du facteur droit pour chaque enregistrement, et entrelacement des blocs-colonnes ou des blocs-lignes des matrices de Hankel des différents enregistrements. Cet algorithme est décrit dans l'article à paraître [17].

Nous pouvons donc maintenant proposer une version dite «polyréférence» pour la méthode d'identification par sous-espaces en ambiance de travail. Cette version va être intégrée au logiciel CADA\_X de LMS, voir module 4.1.

Un théorème de consistance en non-stationnaire de l'estimateur de structure propre ainsi obtenu a été accepté pour publication [18], qui généralise [BF85].

Cette méthode polyréférence a été validée sur deux benchmarks européens du COST F3 «Structural Dynamics», une structure de laboratoire, dite steelquake, et une structure civile, le pont Z24. L'expérimentation sur données réelles collectées sur le pont Z24 a été présentée à IMAC'2001 [34], et à la conférence finale du COST F3 [33]. Cette année, les efforts ont porté principalement sur la structure de laboratoire. Des résultats ont aussi été présentés à cette conférence, et des résultats plus fournis concernant les déformées modales seront présentés à IMAC'2002 [37]. En effet, l'existence d'un modèle aux éléments finis a permis d'étudier plus particulièrement la capacité de la méthode à extraire les déformées modales (composantes observées des vecteurs propres du système). On a étudié plus particulièrement la robustesse de la méthode par rapport aux choix du regroupement des capteurs. Il a été montré que, malgré la non stationnarité des signaux, ainsi que l'absence de jeux de données de longueur statistiquement significative, la méthode faisait aussi bien que les méthodes d'identification sous-espaces classiques dans l'extraction et la reconstruction des vecteurs propres, et cela de manière automatique. Ceci est d'autant plus remarquable que la méthode polyréférence exploite des matrices de covariances plus petites — et donc moins d'information — que la méthode classique. La méthode fournit aussi des diagrammes de stabilisation plus stables et nettoyés des pôles parasites dus à l'excitation.

Il apparaît ainsi que l'opération de moyennisation sous-jacente au calcul des covariances empiriques, combinée avec la propriété de factorisation des covariances, permet de réduire sensiblement les non-stationnarités de l'excitation. Il apparaît aussi que l'introduction de conditions d'excitation différentes compense en quelque sorte la perte d'information due à la taille réduite des matrices de covariance utilisées par l'algorithme polyréférence.

Un travail de comparaison avec les méthodes de fusion de données multi-capteurs utilisées dans l'industrie a commencé en collaboration avec LMS.

**Surveillance, détection et localisation d'endommagements** Nous avons également appliqué nos méthodes de détection et de localisation d'endommagements, voir module 3.1, à ces

---

[BF85] A. BENVENISTE, J.-J. FUCHS, « Single sample modal identification of a non-stationary stochastic process », *IEEE Transactions on Automatic Control AC-30*, 1, janvier 1985, p. 66-74.

deux benchmarks, dans la lignée des expérimentations précédentes [MBBG00,MHv99]. Des résultats ont été présentés à la conférence finale du COST F3 [36]. Deux articles sur ces résultats sont soumis à un numéro spécial de la revue «Mechanical Systems and Signal Processing» consacré à l'ensemble des benchmarks de ce COST.

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

**Participant** : Michèle Basseville.

Un travail précédent, visant à répertorier différents types de définitions, en particulier statistiques, de détectabilité et de diagnosticabilité de pannes affectant soit les capteurs, soit la dynamique de systèmes continus, a été accepté pour publication dans un journal [10].

Un article invité sur les méthodes statistiques de détection de changements a été écrit pour l'Encyclopedia of Life Support Systems.

La collaboration avec Igor Nikiforov (UTT) a été réactivée à l'occasion de la rédaction d'un article de synthèse sollicité pour une session invitée sur le diagnostic soumise au prochain congrès mondial IFAC. Nous avons entrepris de faire le point sur différentes méthodes statistiques de réjection de nuisance d'une part, et de test d'hypothèses multiples d'autre part, et sur leur application au problème du diagnostic de pannes.

### 6.4 Approche statistique pour la validation de modèles flous

**Mots clés** : modèle flou, validation de modèle, détection statistique de changement.

**Participants** : Gerasimos Rigatos, Qinghua Zhang.

La modélisation floue, reposant sur une base de règles floues, constitue une alternative aux réseaux de neurones pour la modélisation de systèmes complexes. Un modèle flou a l'avantage de pouvoir incorporer des connaissances d'expert, tout en offrant la possibilité d'apprentissage automatique. Beaucoup de techniques ont été développées pour la construction de modèles flous, alors que peu de méthodes sont connues pour la validation de modèles flous construits.

Dans cette étude, nous avons appliqué à la validation de modèles flous la méthode locale pour la détection de changement, développée dans le projet pour la détection et le diagnostic de pannes, avec des applications typiquement dans la surveillance de procédés industriels, voir module 3.1. Sous des hypothèses appropriées, cette méthode permet de transformer une large classe de problèmes de détection en un problème asymptotiquement équivalent qui est la détection de changement dans la moyenne d'un vecteur gaussien. Pour la détection de pannes, elle évalue l'adéquation entre les signaux du système surveillé et un modèle de référence

---

[MBBG00] L. MEVEL, A. BENVENISTE, M. BASSEVILLE, M. GOURSAT, « In-operation structural damage detection and diagnosis », in : *European COST F3 Conference on System Identification and Structural Health Monitoring, Madrid*, juin 2000.

[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.

représentant le fonctionnement nominal du système. Cette même évaluation peut également être utilisée pour vérifier la validité de modèle : en cas d'inadéquation détectée, c'est le modèle qui est invalidé. Cette méthode permet aussi de diagnostiquer les règles qui sont en cause quand un modèle flou est invalidé.

L'étude a mis en évidence une particularité des modèles flous qui a des conséquences importantes pour leur validation, ainsi que pour leur apprentissage. Il se trouve que, pour des modèles flous typiques, basés sur une partition floue forte avec des fonctions d'appartenance triangulaires, la matrice d'information de Fisher est singulière. Pour les autres modèles flous, cette matrice d'information est souvent mal conditionnée. Ceci rend difficile, voire impossible, la détection de certains changements dans un modèle flou. Notre solution pour éviter ce problème est de restreindre les tests statistiques à un sous ensemble des paramètres d'un modèle flou. Les résultats de l'étude sont résumés dans [47].

## 6.5 Surveillance des modèles de Markov cachés, et filtrage particulaire

**Mots clés :** HMM, filtrage particulaire, génération de résidus, évaluation des résidus, approche locale.

**Participants :** François Le Gland, Bo Wang.

**Évaluation des résidus pour les HMM à espace d'état général** Il s'agit ici d'étudier le comportement asymptotique du résidu sous l'hypothèse d'un fonctionnement nominal, et sous l'hypothèse alternative d'une petite déviation du paramètre par rapport à la valeur nominale, voir module 3.1.

Nous nous sommes intéressés d'abord au cas des modèles d'état non-linéaires en temps discret, où en plus du paramètre d'intérêt qu'il convient de surveiller, l'état caché initial est considéré comme un paramètre de nuisance dont la valeur est inconnue.

Le résidu auquel nous nous sommes intéressé naturellement est la fonction score, i.e. la dérivée par rapport au paramètre de la fonction de log-vraisemblance, convenablement normalisée, et évaluée pour la valeur nominale du paramètre, i.e. la valeur correspondant à un fonctionnement normal du système à surveiller, par rapport à laquelle il convient de détecter de petites variations. Compte tenu que l'état caché initial est inconnu, nous avons adopté un cadre bayésien, et modélisé cette incertitude à l'aide d'une distribution de probabilité sur l'espace d'état.

Nous avons utilisé le cadre asymptotique des «petits bruits», voir module 3.2, où les covariances des bruits d'état et d'observation tendent simultanément vers zéro, et nous avons obtenu les résultats suivants :

- lorsque les nouvelles données d'observations correspondent effectivement au modèle nominal, le résidu converge vers un vecteur aléatoire gaussien de moyenne nulle et dont la matrice de covariance, c'est-à-dire la matrice d'information de Fisher, est associée à la solution explicite d'un problème de filtrage (filtrage de Kalman) pour un modèle gaussien linéarisé tangent,
- les distributions de probabilités correspondant au modèle nominal, et à un modèle contiguü (correspondant à une valeur du paramètre de plus en plus proche de la valeur nominale),

- vérifient une propriété de normalité asymptotique locale : le rapport de log-vraisemblance entre ces distributions de probabilités converge vers un vecteur aléatoire gaussien, dont on sait calculer la moyenne et la matrice de covariance à l'aide d'un autre problème de filtrage, pour le même modèle gaussien linéarisé tangent, mais initialisé de manière différente (lorsque l'état initial est supposé connu, les deux problèmes de filtrage coïncident),
- il résulte des deux premiers points que, lorsque les nouvelles données d'observations correspondent à un modèle différent du modèle nominal, le résidu converge vers un vecteur aléatoire gaussien de moyenne non-nulle dépendant du changement et dont la matrice de covariance est la même que pour le modèle nominal. La matrice de sensibilité reliant le changement et la moyenne du vecteur aléatoire gaussien est associée à la matrice de corrélation entre les deux filtres de Kalman.

Nous avons ainsi pu instancier dans le cas des modèles d'état non-linéaires, le paradigme de l'approche asymptotique locale pour la surveillance, voir module 3.1 : le problème original de détection d'un changement dans un système dynamique est remplacé par le problème de détection d'un changement dans la moyenne d'un vecteur aléatoire gaussien, i.e. un problème statique universel. En particulier, les matrices de sensibilité et de covariance asymptotique se calculent à l'aide de la valeur nominale du paramètre uniquement. Ces matrices dépendent aussi de l'état caché initial, qui est inconnu et doit être estimé séparément.

Le résultat de normalité asymptotique locale est original, et revêt une importance capitale pour la solution de nombreux autres problèmes statistiques dans les modèles d'état non-linéaires, par exemple pour établir la normalité asymptotique de l'estimateur du maximum de vraisemblance.

Les extensions considérées actuellement concernent l'évaluation des résidus dans le même cadre asymptotique des «petits bruits», pour les modèles d'état en temps continu, avec des observations en temps discret ou en temps continu, avec une approche probabiliste proche de celle utilisée pour les modèles d'état en temps discret. Séparément, de grands progrès ont déjà été réalisés pour résoudre ce même problème, avec une approche analytique.

**Filtrage particulière** Il s'agit ici de mettre en œuvre des méthodes numériques efficaces pour le calcul des résidus proposés.

Une grande classe de fonctions d'estimation pour les HMM peut s'exprimer à l'aide du filtre de prédiction (c'est-à-dire la distribution de probabilité conditionnelle de l'état caché sachant les observations aux instants précédents) et de sa dérivée par rapport au paramètre inconnu, voir module 3.2. Des progrès significatifs ont été réalisés récemment, pour généraliser l'utilisation des techniques de filtrage particulière au calcul du filtre optimal linéarisé tangent <sup>[CL00]</sup> [12], et au calcul de la distribution de probabilité a posteriori de l'état caché initial <sup>[DM00b]</sup>. On dispose ainsi d'algorithmes efficaces pour calculer de façon approchée le

---

[CL00] F. CÉROU, F. LE GLAND, « Efficient particle filters for residual generation in partially observed SDE's », in : *Proceedings of the 39th Conference on Decision and Control, Sydney 2000*, IEEE-CSS, p. 1200–1205, décembre 2000.

[DM00b] P. DEL MORAL, L. MICLO, « Genealogies and increasing propagations of chaos for Feynman-Kac and genetic models », *Publication du Laboratoire de Statistiques et Probabilités n° 00-01*, Université Paul Sabatier, Toulouse, 2000.

résidu proposé, et pour estimer l'état caché initial, dont dépendent les matrices de sensibilité et de covariance asymptotique.

Ces travaux font l'objet d'une collaboration avec Éric Moulines et Olivier Cappé, au département Signal et Image de l'ENST, et avec Pierre Del Moral, au laboratoire de Statistiques et Probabilités de l'université Paul Sabatier, qui a donné lieu à une proposition de projet dans le cadre du programme inter-département MathSTIC du CNRS.

## 6.6 Surveillance des systèmes distribués

Voir modules 3.3, 4.2 et 7.2.

**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.

La surveillance des systèmes distribués était initialement décrite dans le formalisme des réseaux de Petri à capacité un. Ce cadre a été étendu à des compositions d'automates définis sur plusieurs variables, l'interaction s'opérant par mise en commun de variables (de même que les transitions d'un rDP interagissent par mise en commun de places). Les notions de pièces et de dépliages <sup>[ERV96,ER99]</sup> s'étendent naturellement à ces systèmes. De même, les techniques de randomisation partielle, assurant une cohérence entre la notion de concurrence et celle d'indépendance stochastique, y trouvent aussi un prolongement naturel.

Ce formalisme plus général permet de définir des «réseaux bayésiens de systèmes dynamiques». Les réseaux bayésiens permettent de visualiser (et d'exploiter) la structure des relations de dépendance dans un ensemble de variables aléatoires. Plus précisément, ce sont les relations d'indépendance conditionnelle qui sont pertinentes. La construction d'un système distribué par composition d'automates élémentaires permet de voir le système obtenu comme un réseau d'interaction entre systèmes dynamiques, dont les points de contact sont les ressources partagées. Le graphe ainsi obtenu décrit non pas des dépendances stochastiques, mais des contraintes sur les trajectoires des composants élémentaires ainsi reliés. Nous avons montré que le parallèle va plus loin : les réseaux bayésiens traduisent les propriétés de factorisation d'une distribution jointe de probabilité. De même ici, 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 : retrouver toutes les trajectoires du système distribué qui sont compatibles avec un ensemble d'événements observés

- 
- [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.

lors de son évolution, ces observations étant elles-mêmes distribuées (i.e. collectées sur différents composants). Avantage principal de ces méthodes : 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 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 [FBJ<sup>+</sup>00,RF00].

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 7.2. Les efforts actuels, en matière d'algorithmique, portent sur le traitement des pertes d'observations et vont se prolonger vers les problèmes de modèle incomplet. La transcription des méthodes de type «turbo», pour traiter les cycles d'interaction, est aussi à l'étude.

Sur le plan théorique, l'accent a porté cette année sur le raffinement du cadre stochastique pour les systèmes distribués, et en particulier les rDP saufs. La difficulté principale est de préserver la sémantique d'ordre partiel lors de la randomisation, c'est-à-dire d'assurer que les comportements concurrents dans le réseau sont aussi indépendants au sens probabiliste du terme. Cette propriété était déjà disponible dans le cadre des systèmes distribués (ou rDP) partiellement stochastiques, mais ce formalisme est «à horizon fini», c'est-à-dire ne permet que de probabiliser un ensemble donné fini de trajectoires. Pour estimer des probabilités (de transition) dans un système distribué, on a besoin de théorèmes limites, et donc de probabiliser des ensembles infinis de trajectoires.

L'approche naturelle pour les processus markoviens consiste à probabiliser l'ensemble des trajectoires récursivement, par raffinements successifs, en repoussant l'horizon de temps vers l'infini. Cette voie pose un problème pour les systèmes distribués où le temps global n'est justement pas défini. Nous avons exploré plusieurs approches. L'ensemble des trajectoires infinies est constitué par les configurations (infinies) dans le dépliage du système distribué. Ceci permet de coder la sémantique d'ordre partiel. On cherche alors à probabiliser des ensembles de préfixes de ces configurations infinies, préfixes délimités par des «temps d'arrêt» sur le dépliage, ce qui donne une notion naturelle de filtration. L'objectif est alors d'établir une propriété de Markov forte d'un temps d'arrêt au suivant. Cette voie pose des difficultés techniques dans le cas général, mais permet d'aboutir pour les réseaux à choix libres. Une alternative pour probabiliser le dépliage consiste à considérer les «clusters» dans le réseau, vus comme des zones d'interaction élémentaires [43, 42].

---

[FBJ<sup>+</sup>00] E. FABRE, A. BENVENISTE, C. JARD, L. S. RICKER, M. SMITH, « Distributed state reconstruction for discrete event systems », in : *39th IEEE Conference on Decision and Control (CDC), Sydney*, IEEE Control Systems Society, p. 2252–2257, décembre 2000.

[RF00] L. S. RICKER, E. FABRE, « On the construction of modular observers and diagnosers for discrete event systems », in : *39th IEEE Conference on Decision and Control (CDC), Sydney*, IEEE Control Systems Society, p. 2240–2244, décembre 2000.

## 6.7 Codes correcteurs et modèles graphiques

Voir module 4.2.

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

**Participants** : Éric Fabre, Arnaud Guyader.

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, entretenant deux codes convolutifs, le graphe sous-jacent est beaucoup plus compliqué. En particulier, il n'a pas de structure d'arbre, et la propagation de croyance devient donc une méthode approchée de décodage. On peut démontrer que cette méthode est d'autant meilleure que le graphe compte peu de cycles, et que leur longueur est grande.

Ces constatations ont ramené l'attention de la communauté de codage vers la construction de codes directement à partir d'une représentation graphique, et notamment les codes de Gallager, dits «sparse parity checks codes», se sont révélés aussi performants que les turbo-codes. Leur inconvénient reste de n'offrir ces performances que pour des longueurs de bloc importantes.

Nos travaux en ce domaine portent sur deux points, et font l'objet de la thèse d'Arnaud Guyader. Le premier concerne la construction de codes correcteurs à partir de leur représentation sous forme de champ de Markov. Il s'agit de voir s'il est possible de construire des codes performants en abandonnant les hypothèses de «faible densité» du graphe qui les représente. Ce qui signifie le recours à des algorithmes plus élaborés que la propagation de croyance pour les décodés. L'expérience montre que de tels codes sont difficiles à construire pour de petites longueurs (quelques dizaines de bits). Pour des longueurs intermédiaires (quelques centaines de bits), très inférieures à celles des turbo-codes ou des «sparse parity check codes», on peut envisager des méthodes récursives de construction du graphe, par incorporation de contrainte de façon à optimiser le degré de protection tout en maintenant des propriétés graphiques intéressantes. Ce travail est en cours. Conjointement, nos efforts portent sur la compréhension des mécanismes combinatoires assurant les bonnes propriétés asymptotiques des codes pseudo-

---

[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.

aléatoires (circonférence du graphe, facteur d'étalement). L'analyse des propriétés intrinsèques d'un code graphique, hors algorithme de décodage adapté, reste cependant un problème difficile.

Le deuxième centre d'intérêt concerne la conception d'algorithmes approchés de décodage exploitant plus précisément la structure du code. Il s'agit là de proposer des méthodes de décodage pour des codes denses. Ces algorithmes étendent et combinent des méthodes d'estimation classiques pour les réseaux bayésiens et le traitement d'images, et permettent d'étendre la portée de la simple propagation de croyance. En particulier, ils permettent de s'affranchir des difficultés liées à la présence de cycles courts. Des résultats positifs ont été obtenus sur des codes courts combinant les aspects algébriques et graphiques : ils sont conçus comme des codes algébriques élémentaires mis en interaction via une structure graphique [FG00].

En marge de ces recherches sur les bonnes structures graphiques de codes, des applications plus directes des méthodes turbo sont explorées, en collaboration avec le projet TEMICS (Christine Guillemot). Notamment pour le décodage conjoint source-canal. La difficulté réside dans l'utilisation de codes de longueurs variables pour encoder les symboles produit par la source (codes «entropiques», par exemple Huffman), avant l'utilisation d'un code correcteur (code de canal). On doit alors gérer conjointement deux indices de temps dans les algorithmes itératifs : l'horloge de source (production des symboles), et l'horloge bit en sortie du codeur de source, les deux étant liées de façon complexe. Une méthode de «synchronisation soft» a été mise au point pour lutter contre les phénomènes de désynchronisation très pénalisants qui se produisent au décodage pour de telles transmissions [25, 26, 27, 14]. Les travaux s'orientent maintenant vers la transmission par descriptions multiples, et l'utilisation des méthodes turbo pour la quantification de source.

## 6.8 Surveillance de la qualité de service dans un réseau optique

Voir module 7.4.

**Participants** : George Moustakides, Frédéric Céro, Albert Benveniste.

Les réseaux optiques sont à l'heure actuelle de plus en plus utilisés pour toutes sortes de communications, et particulièrement pour du haut débit. Pour l'opérateur, il est crucial de pouvoir garantir une certaine qualité de service (en particulier un taux d'erreur bas<sup>1</sup>) quelle que soit le type, le codage, et le débit des données transmises. Il est donc important de savoir détecter facilement toute anomalie par rapport à la qualité de service nominale, et ce en tout point du réseau. Partant de ces considérations, nous avons développé une méthode permettant d'estimer le taux d'erreur à partir d'un échantillon asynchrone de la puissance optique instantanée. La synchronisation se fait de façon logicielle par construction d'un diagramme de l'œil à partir de l'échantillon. Enfin un modèle de mélange de gaussiennes permet d'estimer

<sup>1</sup>Au niveau du récepteur final, on compare simplement le niveau au centre de chaque bit à un seuil pour décider s'il s'agit d'un 1 ou d'un 0. Il y a une erreur lorsque le signal est suffisamment dégradé pour que le niveau d'un 1 soit inférieur au seuil, ou bien le niveau d'un 0 lui soit supérieur

[FG00] E. FABRE, A. GUYADER, « Dealing with short cycles in graphical codes », *in: IEEE International Symposium on Information Theory (ISIT), Sorrento*, IEEE Information Theory Society, p. 10, juin 2000. Abstract.

le taux d'erreur. Notons que que la seule donnée nécessaire est l'échantillon lui-même. Cette méthode se veut transparente, c'est-à-dire indépendante du débit ou du codage des données, et ne nécessite pas de matériel de synchronisation.

Plus précisément, on applique aux valeurs échantillonnées une fonction non-linéaire pour rendre plus visible leur composante périodique principale, c'est-à-dire le rapport entre la période bit et la période d'échantillonnage. On estime ce rapport en prenant la valeur maximale du périodogramme. Notons que l'on peut obtenir ce rapport ou un multiple de celui-ci. Le point clef est de remarquer que le diagramme de l'œil obtenu en utilisant n'importe laquelle de ces valeurs (version aliasée de la période) est identique, à une symétrie près, au diagramme de l'œil obtenu en utilisant la vraie période. Un autre point clef est d'utiliser ensuite la transformée discrète à la fréquence ainsi trouvée pour ré-estimer la phase de chaque point dans le diagramme de l'œil, et ainsi corriger les imprécisions de l'horloge qui déclenche les prises d'échantillons. Cette façon de reconstruire le diagramme de l'œil est particulièrement élégante et très robuste. Ensuite, pour estimer le taux d'erreur, on détermine une petite fenêtre où l'ouverture de l'œil est maximale, et on utilise les valeurs dans cette fenêtre pour estimer les paramètres d'un modèle de mélange à 8 gaussiennes (8 car on ne prend en compte que les interférences avec les bits voisins). Pour cela, on utilise, comme il est classique, un algorithme EM (Expectation Maximisation) pour calculer de façon itérative le maximum de vraisemblance. Puis le seuil optimal et le taux d'erreur sont calculés à partir de la loi du mélange.

Ces algorithmes ont été codés en langage C dans une bibliothèque qui a pu être utilisée par Alcatel pour évaluer nos méthodes sur des données expérimentales. Bien qu'il y ait encore quelques problèmes de robustesse, notamment au niveau de l'algorithme EM, nos méthode se comparent tout à fait favorablement à d'autres méthodes innovantes plus orientées «hardware». Un brevet a été déposé conjointement à l'INPI sur le sujet.

Dernièrement nous nous sommes aussi intéressés à d'autres problèmes de surveillance optique. Tout d'abord, pour augmenter la «transparence» du dispositif nous avons développé une version logicielle du filtre électrique (présent sur le récepteur final) et qui dépend du débit du signal. À l'occasion de son stage de DEA, Ioannis Krikidis a proposé une méthode statistique pour estimer l'effet du filtre électrique sur la zone de décision du diagramme de l'œil. Les résultats de cette méthode ne sont pas encore tout à fait satisfaisants mais il reste encore des pistes à explorer pour l'améliorer.

Enfin, nous avons également travaillé sur la problème de la détection de la diaphonie intra-bande (in-band crosstalk). En supposant une version particulière du filtre électrique et en sélectionnant une petite partie du diagramme de l'œil ou la dispersion chromatique à peu d'effet, on obtient un échantillon d'une loi qui est d'autant plus proche d'une gaussienne que le niveau de diaphonie est faible. Un test statistique du  $\chi^2$  permet alors de décider de la présence de diaphonie dans le signal. Les premiers essais sur données simulées sont assez bons, mais le modèle étant quelque peu simpliste, cela reste à valider sur données expérimentales.

## 6.9 Synthèse de filtres numériques

**Participant** : Jean-Jacques Fuchs.

Les télécommunications numériques ont créé de nouveaux besoins en matière de filtrage

numérique. On peut citer notamment les filtres interpolateurs, qui jouent un rôle important dans la synchronisation, et les filtres à réponse impulsionnelle finie dont la longueur s'adapte à la puissance de calcul où à la mémoire disponible.

**Interpolateur min-max** On considère un signal  $x(t)$  à bande étroite sur-échantillonné et on cherche un filtre qui reconstruise le signal à l'instant  $\tau$  à l'aide des  $2m$  échantillons les plus proches, en optimisant

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

Les résultats existants concernent  $x \in L_2$  ou, dans le domaine de Fourier,  $\hat{x}(f) \in L_1$ . Notre hypothèse paraît plus générale et plus réaliste. Nous n'arrivons malheureusement qu'à une solution approchée, sans doute assez proche de l'optimum, bien que nous ne sachions pas caractériser cette proximité.

Cette solution admet une forme analytique simple qui la rapproche des filtres interpolateurs déduits des polynômes interpolateurs de Lagrange. Tout se passe comme si on savait transmettre à la méthode de Lagrange l'information sur le taux de sur-échantillonnage associé aux échantillons  $x(t_i)$  utilisés.

**Filtre à réponse impulsionnelle finie à complexité adaptative** Pour synthétiser un filtre à réponse impulsionnelle finie, on tronque et fenêtre la réponse impulsionnelle infinie idéale ou alors on utilise un algorithme d'optimisation : dans les deux cas, le filtre résultant n'est pleinement efficace que non-tronqué. Si pour adapter la charge de calcul à la ressource disponible, on décide de réduire sa longueur, ses performances chutent et à longueur égale il est bien moins performant qu'un filtre conçu initialement pour cette longueur réduite.

Nous avons développé une nouvelle famille de fenêtres ayant la particularité qu'un sous-ensemble de la fenêtre globale est lui-même une fenêtre de la même famille, ayant des propriétés quasi-optimales [28]. On a ainsi mis en évidence une fenêtre qui couvre des atténuations allant de 30 à 70 dB, avec des performances très proches de celles de Kaiser à chaque atténuation intermédiaire.

## 6.10 Analyse de données textuelles

**Mots clés** : recherche d'informations, veille technologique, analyse de données textuelles.

**Participants** : Annie Morin, Rodolphe Priam.

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

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

Les réponses apportées actuellement dans la littérature au traitement de données textuelles tournent autour de plusieurs sujets à savoir :

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

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

- La première méthode est basée essentiellement sur l'analyse factorielle des correspondances (AFC) et sur la classification ascendante hiérarchique (CAH). Dans une première étape, on fait le dictionnaire des mots, avec calcul de la fréquence des mots et fréquence de leur occurrence. Un tableau de correspondances entre les 1000 premiers mots classés par ordre décroissant de fréquence et les documents (il peut s'agir de messages sur le web ou de résumés d'articles) de l'échantillon est constitué. Ce tableau, dont on élimine les documents ayant moins d'un certain nombre d'occurrences de mots, est soumis à une AFC, puis à une CAH sur les facteurs, afin de segmenter l'échantillon en classes relativement homogènes. L'analyse factorielle systématique de ces classes permet de récupérer, pour chaque facteur, deux groupes de mots ayant une contribution à la valeur propre du facteur supérieure à 2 fois la valeur moyenne des contributions. Ces mots sont appelés des «méta clés» quand on a pour objectif l'indexation des textes.
- Nous utilisons aussi le «latent semantic indexing» (LSI), méthode concurrente de l'AFC très utilisée aux Etats-Unis. Cette technique voisine de l'AFC est basée sur la décomposition en valeurs singulières de la matrice de fréquences croisant les textes à indexer et les mots.
- Une troisième méthode basée sur l'utilisation des cartes auto-organisatrices (SOM) de Kohonen paraît très prometteuse en termes de fiabilité de résultats (qualité de l'indexation) et de rapidité des calculs, et permet donc de traiter de très grands fichiers de données textuelles.

Dans le cadre de sa thèse, Rodolphe Priam étudie

- La généralisation d'un plan classique de l'analyse factorielle des correspondances (AFC) en une surface discrète (non-linéaire) à l'aide d'une approche neuronale de type carte de Kohonen (SOM). Pour ce faire, on élabore une méthode originale : un mélange de multinomiales contraintes en grille bidimensionnelle. Des critères métriques ont été obtenus par la même occasion. Un prototype a été implémenté (C++, Matlab) pour valider la méthode.
- Les réseaux bayésiens comme moyen de navigation intuitif et efficace dans les grands corpus textuels avec la modélisation par un graphe sémantique d'une base de données

dynamiques. Cette approche doit permettre des mises à jour aisées des paramètres et amener à terme sur une base solide en vue des futures applications d'indexation automatique et de classification. Un logiciel est en cours d'élaboration.

Par ailleurs, nous travaillons en étroite collaboration avec Michel Kerbaol et Jean-Yves Bansard du Laboratoire de Santé Publique de l'université de Rennes 1, spécialistes de recherche documentaire et veille technologique en médecine.

## 7 Contrats industriels (nationaux, européens et internationaux)

### 7.1 Analyse de structures vibrantes — Projets Eurêka SINOPSYS et FLITE

*Voir modules 4.1 et 6.2. Contrat INRIA — mai 2001/octobre 2003.*

**Participants :** Laurent Mevel, Albert Benveniste, Michèle Basseville.

Le projet SIGMA2 a participé, en collaboration avec le projet METALAU (Maurice Goursat), au projet Eurêka SINOPSYS sur l'analyse de structures vibrantes en ambiance de travail. Outre l'INRIA, sont membres de ce projet LMS (maître d'œuvre), ISMC et KUL (Belgique), Sopemea et Centrale Recherche (France), VUM (Royaume-Uni), université de Cracovie et PZL-Swidnik (Pologne), Saab-Scania (Suède). Ce projet s'est achevé en février 2000. 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 la société belge LMS (un des deux leaders mondiaux du domaine) 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 <sup>[GBBM00]</sup>. Le module d'identification de structure en opération a été en particulier testé sur les données du vol d'essai Ariane 501, et les résultats en ont été présentés à IMAC'2001 [30]. Un article sur l'identification écrit en commun avec LMS est accepté pour parution dans un numéro spécial d'un journal de l'ASME consacré à l'identification de systèmes mécaniques [9].

Une version dite «polyréférence», pour la méthode d'identification par sous-espace en ambiance de travail, a été développée [17, 18] et va être intégrée au logiciel CADA\_X de LMS, voir module 4.1. L'expérimentation sur données réelles collectées sur un pont a été présentée à IMAC'2001 [34], et à la conférence finale du COST F3 [33]. L'application à un autre benchmark de ce COST a aussi été présentée, et des résultats plus fournis concernant les déformées modales seront présentés à IMAC'2002 [37], voir module 6.2.

Le nouveau projet Eurêka FLITE (Flight Test Easy) a démarré en mai 2001, et concerne le domaine de l'aéronautique. Le projet, presque à moitié français, 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, METALAU et MACS).

Ce projet 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). Un deuxième objectif est de permettre

---

[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.

un élargissement et une exploitation plus rapide du domaine de vol. Un premier traitement de données réelles a été effectué par Maurice Goursat. Un des exemples d'application visés concerne l'A3XX.

## 7.2 Diagnostic de pannes dans les réseaux de télécommunications — Projets RNRT exploratoires MAGDA et MAGDA2

*Voir modules 3.3 et 6.6. Contrat INRIA 2 98 C 561 00 MPR 01 1 — novembre 1998/novembre 2001*

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

Cette activité est partagée avec le projet TRISKELL (Claude Jard). Elle se situait initialement dans le cadre de la CTF-CNET 95 1B 151, et se prolongeait depuis septembre 1998 par le projet RNRT exploratoire \scmagda «Modélisation et Apprentissage pour une Gestion Distribuée des Alarmes». Un nouveau projet RNRT exploratoire MAGDA2 le prolonge pour 2 ans. 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, voir module 6.6.

Le projet RNRT MAGDA 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 1) la construction modulaire du modèle de réseau, par interconnexion de composants types, 2) l'algorithmique distribuée de supervision, alimentée par les alarmes reçues du réseau par une vraie plateforme industrielle de gestion de réseau (ALMAP), et 3) un outil de visualisation des résultats du diagnostic le plus vraisemblable, vu comme un graphe de causalité entre défaillances.

L'ensemble des acteurs du projet MAGDA se retrouve dans un nouveau projet RNRT exploratoire \scmagda2, qui se donne pour objectif d'étendre cette technologie aux réseaux hétérogènes, tout en augmentant sa robustesse.

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

*Contrat INRIA — octobre 2001/juin 2004*

**Participant** : Éric Fabre.

Le projet RNRT précompétitif \scvip «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 projet 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.

### 7.4 Diagnostic optique transparent — Contrat Alcatel

*Voir module 6.8. Contrat INRIA 1 01 C 0491 00 31321 01 2 — juin 2001/novembre 2001.*

**Participants** : George Moustakides, Frédéric Céro, 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. La méthode que nous avons développée précédemment supposait un échantillonnage parfait et demandait une certaine connaissance a priori du temps bit et de la fréquence d'échantillonnage. La méthode que nous avons développée cette année est complètement transparente et ne demande aucune connaissance a priori. De plus nous avons considéré un échantillonnage imparfait, c'est-à-dire que l'horloge qui déclenche la mesure d'un échantillon commet une erreur, certes faible, mais cumulative, modélisée par une marche aléatoire. Ce type d'erreur, même faible, peut rendre le diagramme de l'œil inutilisable (car complètement fermé) rendant inopérant le calcul du taux d'erreurs. Nous avons donc développé une méthode simple, elle aussi transparente, capable de corriger les effets catastrophiques des imprécisions de l'horloge, et d'obtenir un diagramme de l'œil correct. Des tests faits par Alcatel sur des données expérimentales obtenues sur un banc d'essai ont démontré la robustesse des solutions proposées.

Pour augmenter la transparence du système de calcul du taux d'erreurs par rapport au débit du signal transmis, il serait très intéressant de savoir simuler l'effet du filtre électrique (présent sur le récepteur final) par logiciel, directement sur les échantillons. Pour ce faire, nous avons développé une méthode statistique pour estimer l'effet du filtre électrique sur la zone de décision du diagramme de l'œil. Les résultats de cette méthode ne sont pas encore tout à fait satisfaisants mais il reste encore des pistes à explorer pour l'améliorer.

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

*Contrat INRIA 1 99 C 271 00 31321 01 2 — mars 1999/janvier 2002.*

**Participants** : Arnaud Clavel, Qinghua Zhang, Bernard Delyon.

Les véhicules routiers, automobiles et poids-lourds, présentent des comportements parfois instables en fonction notamment de la vitesse, de l'adhérence 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, cette étude a 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.

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

*Contrat INRIA 1 01 C 0104 00 31321 01 2 — janvier 2001/décembre 2003.*

**Participants** : Olivier Perrin, Qinghua Zhang, Michèle Basseville.

Cette étude est conjointe avec le projet SOSSO.

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.

Des études ont déjà été menées ou sont en cours au sein du projet SOSSO sur la modélisation de certains organes de véhicules automobiles à basse consommation, tels que les pots catalytiques, les capteurs de gaz, les piles à combustible et les filtres à particules. Ces modèles constituent une classe particulière d'équations de réaction-diffusion d'où un modèle générique a été dégagé. La conception d'algorithmes pour l'«On Board Diagnosis» (OBD) à partir d'un modèle du système surveillé nécessite souvent une simplification appropriée du modèle disponible, à cause des contraintes sur les moyens de calcul embarqués. Une méthodologie de simplification adaptée au modèle générique mentionné plus haut est déjà développée dans le projet SOSSO.

Dans le cadre d'une convention Cifre, la présente étude a pour objectif, d'une part, partant du modèle générique, d'approfondir et de perfectionner la modélisation réduite de divers organes, et d'autre part, de concevoir et étudier des algorithmes à base de modèles pour leur surveillance.

## 8 Actions régionales, nationales et internationales

### 8.1 Identification des systèmes — Réseau TMR SI

*Contrat université de Rennes 1 MW 33 — mars 1998/février 2002.*

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

Le projet SIGMA2 participe au réseau européen \scsi «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 à Cambridge, UK du 24 au 26 septembre. Notre contribution concerne l'identification des systèmes hybrides, l'identification des HMM, la surveillance et le diagnostic, et les observateurs non-linéaires.

### 8.2 Méthodes statistiques pour les systèmes dynamiques stochastiques — Réseau IHP DYNSTOCH

*Voir module 6.5. Rattachement à l'équipe de Paris VI — septembre 2000/août 2004.*

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

Nous participons également au réseau européen \scdynstoch «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 l'Institut Henri Poincaré du 13 au 16 septembre. Notre contribution au sein de l'équipe française concerne la statistique asymptotique des HMM (à espace d'état fini ou continu).

### 8.3 Autres actions internationales

M. Basseville a été membre du groupe de travail wg2 «Health Monitoring and Damage Detection», du COST F3 «Structural Dynamics», clos depuis juin 2001. La participation à ce groupe a été un complément intéressant à la diffusion de notre savoir-faire en surveillance vibratoire.

### 8.4 Visites, et invitations de chercheurs

Bernard C. Lévy, professeur au Department of Electrical and Computer Engineering (ECE) de University of California, Davis, en visite dans le projet METALAU à Rocquencourt, a séjourné dans le projet du 20 au 22 novembre.

## 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) en renouvellement. Elle est membre des comités techniques IFAC IAF-TC «Fault Detection, Supervision and Safety of Technical Processes», relevant du comité de coordination IA-CC «Industrial Applications», et 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». Elle est membre des comités internationaux de programme de DAMAS'2001 (Damage Assessment in Structures) et F3'2001 (conférence finale du COST F3 «Structural Dynamics»). Elle a été sollicitée pour l'évaluation de projets soumis au Programme for Strategic Technological Research (GBOU) de l'IWT (Institute for the Promotion of Innovation by Science and Technology in Flanders).

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 du comité de programme du GRETSI'2001 qui s'est tenu à Toulouse du 10 au 13 septembre 2001.

A. Morin est responsable du groupe enseignement de la statistique de la SFDS (Société Francophone de Statistique). Elle est membre du comité scientifique de la conférence ITI (Information Technology Interfaces) qui a lieu à Pula, Croatie, en juin 2001.

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.

### 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.

A. Morin enseigne dans différentes formations de 3ème cycle de l'université de Rennes 1 : l'«Analyse des données» en DESS de mathématiques, la «Maîtrise statistique des processus» en DESS composants micro-électroniques, les «Plans d'expérience et la fiabilité» en DEA d'électronique.

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

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.

Lors du workshop annuel du réseau TMR ERNSI, voir module 8.1, qui a eu lieu à Cambridge, UK en septembre, É. Fabre a donné un exposé sur l'estimation d'état dans les systèmes distribués à événements discrets, Q. Zhang a donné un exposé sur les observateurs adaptatifs pour les systèmes linéaires MIMO variables dans le temps, et G. Rigatos a présenté un poster sur la validation de modèles flous par l'approche statistique locale.

S. Haar a présenté des travaux communs avec A. Benveniste et É. Fabre sur les «Markov nets» au workshop «Concurrency in Dependable Computing» satellite de la conférence «Application and Theory of Petri Nets» (ICATPN'2001) à Newcastle en juin, et au workshop «Performability Modeling of Computer and Communication Systems» (PMCCS5) à Erlangen en septembre. Il a donné un exposé sur les ordres cycliques comme modèles de processus concurrents au workshop «Geometric and Topological Methods in Concurrency» (GETCO'2001) à Aalborg en août. Il a présenté des travaux communs avec François Baccelli sur les équations de compteurs pour les réseaux temporisés au workshop «Max/Plus Algebras and their Applications to Discrete Event Systems, Theoretical Computer Science, and Optimization» satellite du symposium IFAC «System Structure and Control» à Prague en août.

F. Le Gland a présenté des travaux communs avec B. Wang sur l'asymptotique «petits bruits» pour la statistique des systèmes non-linéaires stochastiques au workshop annuel du réseau IHP DYNSTOCH, voir module 8.2, qui s'est tenu à l'Institut Henri Poincaré en juin, et au workshop «Stochastic Theory and Control» en l'honneur de Tyrone Duncan à Lawrence, KS en octobre. Il a donné un exposé sur l'approximation particulière du filtre linéarisé tangent au workshop «Particle Systems and Filtering» qui s'est tenu à l'Institut Henri Poincaré en juin, et dans le cadre de l'école d'été «Méthodes de Monte Carlo pour l'Inférence Statistique» organisée au CIRM en septembre. Sur ce sujet, il est également intervenu dans le cours «Interacting Particle Approximations of Nonlinear Filtering Problems» donné par Pierre Del Moral au Department of Operations Research and Financial Engineering (ORFE) de Princeton, en octobre.

Q. Zhang a donné un exposé sur la conception d'observateurs adaptatifs à convergence exponentielle pour les systèmes multi-entrée multi-sortie, au workshop du réseau TMR «Nonlinear Control Network» à Irsee (Allemagne) en avril, et un exposé sur les observateurs adaptatifs pour la surveillance et le diagnostic, lors de sa visite au Department of Electrical and Computer Engineering de George Mason University en juin.

## 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.

## Articles et chapitres de livre

- [9] 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.
- [10] M. BASSEVILLE, « On fault detectability and isolability », *European Journal of Control* 7, 6, 2001, à paraître.
- [11] A. BENVENISTE, F. LE GLAND, E. FABRE, S. HAAR, « Distributed hidden Markov models », in : *Optimal Control and PDE's — Innovations and Applications. In honor of A. Bensoussan on the occasion of his 60th birthday*, J.-L. Menaldi, E. Rofman, et A. Sulem (éditeurs), IOS Press, Amsterdam, 2001, p. 211–220.
- [12] 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 A. Bensoussan on the occasion of his 60th birthday*, J.-L. Menaldi, E. Rofman, et A. Sulem (éditeurs), IOS Press, Amsterdam, 2001, p. 231–240.
- [13] J.-J. FUCHS, « On the application of the global matched filter to DOA estimation with uniform circular arrays », *IEEE Transactions on Signal Processing SP-49*, 4, avril 2001, p. 702–709.
- [14] A. GUYADER, E. FABRE, C. GUILLEMOT, M. ROBERT, « Joint source-channel turbo decoding of entropy-coded sources », *IEEE Journal on Selected Areas in Communications SAC-19*, 9 (Special issue on the Turbo Principle : from Theory to Practice II), septembre 2001, p. 1680–1696.
- [15] S. HAAR, « Clusters, confusion and unfoldings », *Fundamentæ Informaticæ*, à paraître.
- [16] M. JOANNIDES, F. LE GLAND, « Small noise asymptotics of the Bayesian estimator in nonidentifiable models », *Statistical Inference for Stochastic Processes*, à paraître.
- [17] 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.

- [18] 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.
- [19] C. MUSSO, N. OUDJANE, F. LE GLAND, « Improving regularized particle filters », in : *Sequential Monte Carlo Methods in Practice*, A. Doucet, N. de Freitas, et N. Gordon (éditeurs), *Statistics for Engineering and Information Science*, Springer Verlag, New York, 2001, ch. 12, p. 247–271.
- [20] Q. ZHANG, « Model based fault detection and identification », in : *Multivariable System Identification for Process Control*, Y. Zhu (éditeur), Elsevier Science Ltd., Oxford, 2001, ch. 11, p. 293–327.
- [21] Q. ZHANG, « Adaptive observer for MIMO linear time varying systems », *IEEE Transactions on Automatic Control AC-47*, 3, mars 2002, à paraître.

### Communications à des congrès, colloques, etc.

- [22] M. BASSEVILLE, L. MEVEL, M. GOURSAT, « Identification aveugle de structure propre sous excitation non-stationnaire », in : *18ème Colloque GRETSI, Toulouse*, septembre 2001.
- [23] A. BENVENISTE, E. FABRE, S. HAAR, « Hidden Markov models for distributed and concurrent systems », in : *40th IEEE Conference on Decision and Control (CDC), Orlando*, IEEE Control Systems Society, décembre 2001. Paper FrP12–6.
- [24] A. CLAVEL, M. SORINE, Q. ZHANG, « Modelling and identification of a leaf spring system », in : *3rd IFAC Workshop on Advances in Automotive Control, Karlsruhe*, IFAC, mars 2001.
- [25] E. FABRE, A. GUYADER, C. GUILLEMOT, « Joint source-channel turbo decoding of VLC-coded Markov sources », in : *26th IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing (ICASSP), Salt Lake City, Volume IV*, IEEE Signal Processing Society, mai 2001.
- [26] E. FABRE, A. GUYADER, C. GUILLEMOT, « Joint source-channel turbo decoding of VLC-encoded Markov sources », in : *18ème Colloque GRETSI, Toulouse*, septembre 2001.
- [27] E. FABRE, A. GUYADER, C. GUILLEMOT, « Robust decoding of VLC-encoded Markov sources », in : *18ème Colloque GRETSI, Toulouse*, septembre 2001.
- [28] J.-J. FUCHS, « A class of approximate FIR low pass filters », in : *IEEE International Symposium on Circuits and Systems (ISCAS), Sydney, Volume II*, IEEE Circuits and Systems Society, p. 81–84, mai 2001.
- [29] B. GAUJAL, S. HAAR, J. MAIRESSE, « Blocking a transition in a Petri net, and what it tells about its asymptotic behavior », in : *11th INFORMS Applied Probability Conference, New York*, INFORMS, juin 2001.
- [30] M. GOURSAT, M. BASSEVILLE, A. BENVENISTE, L. MEVEL, « Output-only modal analysis of the Ariane V launcher », in : *19th International Modal Analysis Conference (IMAC-XIX), Kissimmee*, SEM, Inc., février 2001.
- [31] S. HAAR, F. BACCELLI, « Counter equations for timed competition nets », in : *Workshop on Max-Plus Algebras and their Applications to Discrete-Event Systems, Theoretical Computer Science, and Optimization, Prague*, IFAC, août 2001.
- [32] S. HAAR, A. BENVENISTE, E. FABRE, « Markov nets : A new probabilistic model for fault diagnosis in concurrent systems », in : *Workshop on Concurrency in Dependable Computing, Newcastle*, juin 2001.
- [33] L. MEVEL, M. BASSEVILLE, M. GOURSAT, A. BENVENISTE, « In-operation subspace-based covariance-driven structural identification — Application to the steelquake and Z24 bridge benchmarks », in : *International Conference on Structural System Identification, Kassel*, septembre 2001.

- [34] L. MEVEL, A. BENVENISTE, M. BASSEVILLE, M. GOURSAT, « Polyreference subspace based modal identification of a concrete three span bridge », *in : 19th International Modal Analysis Conference (IMAC-XIX), Kissimmee*, SEM, Inc., février 2001.
- [35] L. MEVEL, L. FINESSO, « Asymptotical statistics of misspecified hidden Markov models », *in : 40th IEEE Conference on Decision and Control (CDC), Orlando*, IEEE Control Systems Society, décembre 2001. Paper WeM13-5.
- [36] L. MEVEL, M. GOURSAT, M. BASSEVILLE, A. BENVENISTE, « In-operation damage detection and localization - Application to the steelquake and Z24 bridge benchmarks », *in : International Conference on Structural System Identification, Kassel*, septembre 2001.
- [37] 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.
- [38] Q. ZHANG, A. CLAVEL, « Adaptive observer with exponential forgetting factor for linear time varying systems », *in : 40th IEEE Conference on Decision and Control (CDC), Orlando*, IEEE Control Systems Society, décembre 2001. Paper FrA05-3.
- [39] Q. ZHANG, B. DELYON, « A new approach to adaptive observer design for MIMO systems », *in : 2001 American Control Conference (ACC), Arlington*, American Automatic Control Council, p. 1545–1550, juin 2001.
- [40] Q. ZHANG, A. XU, « Global adaptive observer for a class of nonlinear systems », *in : 40th IEEE Conference on Decision and Control (CDC), Orlando*, IEEE Control Systems Society, décembre 2001. Paper ThP01-5.
- [41] Q. ZHANG, A. XU, « Implicit adaptive observers for a class of nonlinear systems », *in : 2001 American Control Conference (ACC), Arlington*, American Automatic Control Council, p. 1551–1556, juin 2001.

## Rapports de recherche et publications internes

- [42] 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>.
- [43] A. BENVENISTE, E. FABRE, C. JARD, S. HAAR, « Diagnosis of asynchronous discrete event systems, a net unfolding approach », *Publication Interne n°1399*, IRISA, mai 2001, <ftp://ftp.irisa.fr/techreports/2001/PI-1399.ps.gz>.
- [44] B. GAUJAL, S. HAAR, J. MAIRESSE, « Blocking a transition in a free choice net, and what it tells about its throughput », *Rapport de Recherche n°4225*, INRIA, juillet 2001, <ftp://ftp.inria.fr/INRIA/publication/publi-ps-gz/RR/RR-4225.ps.gz>.
- [45] 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>.
- [46] L. MEVEL, L. FINESSO, « Asymptotical statistics of misspecified hidden Markov models », *Publication Interne n°1426*, IRISA, novembre 2001, <ftp://ftp.irisa.fr/techreports/2001/PI-1426.ps.gz>.
- [47] G. RIGATOS, Q. ZHANG, « Fuzzy model validation using the local statistical approach », *Publication Interne n°1417*, IRISA, octobre 2001, <ftp://ftp.irisa.fr/techreports/2001/PI-1417.ps.gz>.

- 
- [48] Q. ZHANG, A. XU, « Global adaptive observer for a class of nonlinear systems », *Publication Interne n° 1414*, IRISA, septembre 2001, <ftp://ftp.irisa.fr/techreports/2001/PI-1414.ps.gz>.
- [49] Q. ZHANG, « Adaptive observers for MIMO linear time varying systems », *Publication Interne n° 1379*, IRISA, janvier 2001, <ftp://ftp.irisa.fr/techreports/2001/PI-1379.ps.gz>.

## Divers

- [50] J.-J. FUCHS, « Le filtre adapté global », Journées d'études SEE — Antennes non-standard : techniques et traitements, mars 2001.