

---

# Projet SOSSO

## Applications et Outils de l'Automatique

---

**Localisation :** *Rocquencourt*

**Mots-clés :** SOSSO, modélisation de système dynamique, commande de processus, commande de système mécanique, automatique et automobile, traitement du signal, traitement de signal biomédical, temps réel.

### 1 Composition de l'équipe

#### **Responsable scientifique**

Michel Sorine, DR Inria

#### **Secrétaire**

Martine Verneuille, SAR Inria

#### **Personnel Inria**

Pierre-Alexandre Bliman, CR

Catherine Bonnet, CR

Jean Clairambault, détaché de l'Éducation Nationale, CR jusqu'au 31/8/96

Jacques Henry, DR, Action ATGC, à temps partiel dans SOSSO

Claire Médigue, IE

Yves Sorel, DR

#### **Personnel CNRS**

Mayer Landau, CR, URA 1323, à temps partiel dans SOSSO

#### **Chercheurs invités**

Alexandre M. Krasnosel'skii, Université de Moscou

Pavel Krejčí, Institut des Mathématiques, Prague

Jonathan Partington, Université de Leeds

Malcolm Smith, Université de Cambridge

Victor Zhuravlev, Institut pour les Problèmes de la Mécanique de Moscou

#### **Ingénieur expert**

Christophe Lavarenne

#### **Chercheur post-doctorant**

Kamal Aouchiche

### Chercheurs doctorants

Hélène Cima, Cifre Renault  
 Pascal Daviet, Boursier Praxitèle  
 Rémy Kocik, Boursier Praxitèle depuis le 1/10/95  
 David Maurel, Cifre Renault  
 Joël Szymanski, Cifre Renault  
 Christophe Vermeiren, boursier HCM  
 Annie Vicard, boursière Inria

### Collaborateurs extérieurs

Jean Clairambault, PRAG à l'Université Paris VIII, St Denis, depuis le 1/9/96  
 Jean-Pierre Yvon, professeur, UTC

### Stagiaires

Christophe Berge, IUT Villetaneuse, Paris XIII  
 Julie Bestel, DEA MIA, ENS Cachan  
 Thierry Grandpierre, DEA SETI, Université Paris XI, Orsay  
 Ahmed Ketfi-Cherif, École Centrale de Lyon (3ème année et DEA d'automatique)  
 Éric Le Tinier, ESIEE  
 Valérie Lecoq, Université François Rabelais, Tours  
 François Maillard, École Polytechnique  
 Pierre Ravier, École Polytechnique  
 Pedro Rodriguez, École Supérieure d'Électricité

## 2 Présentation du projet

L'Automatique est l'objet de recherches méthodologiques qui souvent présupposent la connaissance d'un modèle du système à commander et l'existence de techniques informatiques pour la réalisation de l'organe de commande. En fait, dans certaines applications industrielles complexes, les difficultés de mise en œuvre des méthodes de l'Automatique viennent souvent des problèmes amont de modélisation et aval d'informatique temps réel dont on ne peut pas s'abstraire complètement : le choix d'un modèle pour la commande d'un système complexe peut dépendre de la nature du contrôleur, des actionneurs et capteurs disponibles ... Un contrôleur ne sera finalement retenu que si sa complexité est maîtrisée avec les outils de développement disponibles. Le Traitement du Signal, dans les applications que nous considérons pose le même type de problèmes.

L'objectif de ce projet est donc de participer à des recherches appliquées, importantes d'un point de vue économique et social, dans lesquelles l'apport de l'Automatique peut être décisif mais est conditionné par la résolution de problèmes de mise en œuvre.

Les domaines de l'AUTOMOBILE et de la SANTÉ, dans lesquels nous avons choisi d'investir, offrent de nombreuses applications de ce type. Aujourd'hui, les thèmes abordés sont :

- Dans le domaine Automobile, en coopération avec Renault : la *dépollution des moteurs thermiques* (essence et diesel, en coopération avec le projet SIGMA2 pour les aspects diagnostic), la *sécurité active* (problèmes liés à l'adhérence) et les *systèmes de contrôle distribué des voitures du futur* (problèmes de programmation de tâches de commande sur un réseau de micro-contrôleurs, en coopération avec Praxitèle).
- Dans le domaine de la Santé, en coopération avec l'Inserm, l'Assistance Publique et des partenaires européens, les *systèmes de pré-traitement temps réel de signaux polygraphiques* pour la recherche médicale, les applications cliniques, la télé-médecine (diagnostic et thérapie).

Les sujets précis sont choisis en fonction de compétences que nous voulons développer dans le projet :

- *La modélisation mathématique, l'identification et la commande* :
  - de systèmes à hystérésis avec principalement une application aux problèmes de frottements. Nous rencontrons actuellement de tels problèmes lors de l'étude du contact pneu/sol et de certaines boîtes de vitesse. L'hystérésis intervient aussi dans des problèmes de commande moteur, du fait de l'utilisation de capteurs tout-ou-rien, et en électrophysiologie cardiaque. L'étude des comportements périodiques de ces systèmes est souvent nécessaire pour nos applications.
  - de phénomènes physico-chimiques, avec application à des problèmes de membranes biologiques (membranes de cellules cardiaques par exemple) et à des problèmes d'utilisation de pots catalytiques et sondes de richesse pour moteurs à combustion interne. Dans ce dernier cas, les modèles sont recherchés pour résoudre un problème de commande et de surveillance/diagnostic.
  - de systèmes à retards qui interviennent en automobile (régulation de richesse des gaz, commande d'organes à travers un bus multiplexé, ...).
  - de systèmes biologiques, avec application à l'analyse et à la commande pharmacologique du système cardiovasculaire.
- *La programmation temps réel synchrone d'algorithmes de commande et de traitement du signal* :
  - spécification de traitements multicalendres complexes en utilisant SIGNAL (langage synchrone développé à l'Inria). Application au traitement de signaux physiologiques (ECG, respiratoire, pression artérielle, mouvements, EEG) avec le développement de LARY\_C.
  - étude d'une méthodologie d'aide à l'implantation optimisée d'applications spécifiées avec les langages synchrones, s'exécutant en temps réel sur des architectures multi-composants. Cela donne lieu au développement du logiciel SynDEX et, en coopération avec un groupement d'industriels, à l'étude de micro-contrôleurs adaptés à ces techniques logicielles.

### 3 Actions de recherche

#### 3.1 Modèles d'hystérésis et applications

*Participants* : Pierre-Alexandre Bliman, Alexandre M. Krasnosel'skii, Pavel Krejčí, Michel Sorine

La principale motivation de ces travaux est la modélisation, l'analyse et la commande de systèmes à hystérésis que nous rencontrons dans nos applications :

- Systèmes mécaniques en présence de frottements secs. Les problèmes peuvent être la compensation des frottements lorsqu'ils limitent les performances de régulateurs classiques, ou leur maximisation comme dans le cas des problèmes d'adhérence (voir plus loin la coopération avec Renault sur le contact pneu/sol).

Le point de vue adopté est de modéliser ces frottements par les opérateurs d'hystérésis dissipatifs que nous avons proposés précédemment.

- Systèmes électrochimiques. Des phénomènes d'hystérésis apparaissent en liaison avec les modèles de pots catalytiques et sondes de richesse des gaz d'échappement de moteurs thermiques.

##### 3.1.1 Comportement qualitatif des systèmes à hystérésis

*Participants* : Pierre-Alexandre Bliman, Alexandre M. Krasnosel'skii, Michel Sorine

Nous avons continué les recherches sur les propriétés qualitatives des équations différentielles couplées avec des opérateurs d'hystérésis. Nous nous sommes plus particulièrement intéressés à l'existence de cycles limites pour des systèmes à relais, qui modélisent, par exemple, la régulation de la richesse des gaz d'échappement d'un moteur thermique par une loi de commande "tout-ou-rien" : lorsque la richesse à contrôler descend en-deça de  $(100 - \alpha)\%$  de la valeur stœchiométrique, le mélange est enrichi (relais à 1) : durée d'injection d'essence plus longue; il est appauvri lorsque la richesse excède  $(100 + \beta)\%$  de cette valeur (relais à  $-1$ ). Le comportement "tout-ou-rien" vient du capteur de richesse utilisé, une sonde "lambda". L'hystérésis est introduite par le contrôleur.

Nous avons considéré les systèmes de la forme

$$L\left(\frac{d}{dt}\right)u = M\left(\frac{d}{dt}\right)R_{\alpha\beta}(u)$$

où la fonction de transfert  $M/L$  est stable, et le choix des seuils du relais non-idéal  $R_{\alpha\beta}$  est tel que toute solution exécute un nombre infini de transitions entre les deux modes du système, solutions de  $L\left(\frac{d}{dt}\right)u = \pm M(0)$ .

Du fait des propriétés de  $R_{\alpha\beta}$ , lors de l'étude des solutions périodiques, on a affaire à des opérateurs de Poincaré discontinus : l'instant auquel un changement de mode a lieu peut varier de manière discontinue au voisinage d'une trajectoire rencontrant *tangentiellement* une surface de transition. Une analyse plus fine permet cependant de donner des conditions suffisantes de continuité, et de conclure ainsi à l'existence de solutions périodiques à l'aide du théorème de point fixe de Brouwer. Ces idées sont appliquées à des systèmes du 3ème ordre.

### 3.1.2 Modélisation de frottements secs

*Participants* : Pierre-Alexandre Bliman, Pavel Krejčí, Michel Sorine, Joël Szymanski

Nous avons proposé les années passées une classe de modèles de frottements secs, admettant une représentation d'état, qui unifie la description des comportements de type Coulomb et des phénomènes constatés lors des changements de signe de la vitesse (stiction, effet Dahl, ...). Nous avons continué l'étude de ces modèles, de type "boîte noire" dans deux directions :

- *Bases physiques des modèles.* Interprétation thermo-mécanique de nos modèles, actuellement scalaires, en vue de l'extension au cas vectoriel. Cela est motivé par l'application au contact pneu/sol.
- *Étude de frottements distribués.* L'étude précédente laisse penser que certains des modèles (Dahl du premier ordre) peuvent servir de modèles rhéologiques pour certains milieux continus. Nous avons continué la coopération sur ce thème avec P. Krejčí, en étudiant une équation des ondes avec second membre hystérétique représentant les déformations d'une courroie frottant sur deux poulies. Il s'agit d'un modèle très idéalisé de boîte de vitesse à rapport continu que nous rencontrons dans une étude avec Renault :

$$\begin{cases} \rho u_{tt} - k u_{xx} = H(u) \\ \text{avec des conditions aux limites et initiales adéquates} \end{cases}$$

## 3.2 Commande de systèmes à retards

*Participants* : Kamal Aouchiche, Catherine Bonnet, Michel Sorine

Nous avons étudié, en collaboration avec J.R. Partington (université de Leeds), le problème de stabilisation robuste optimale et, simultanément, de régulation optimale de systèmes scalaires (de dimension infinie) dans un cadre  $L^\infty$ . Considérant des contrôleurs à deux degrés de liberté, les problèmes de stabilisation et régulation ont pu être traités de façon indépendante. Comme les contrôleurs stabilisants "classiques", ces contrôleurs s'expriment en fonction des factorisations coprimes normalisées et facteurs de Bezout du système. En vue du contrôle robuste de systèmes à retards, nous avons déterminé des expressions explicites des facteurs de Bezout pour des systèmes à retards généraux qui appartiennent à la classe de Callier-Desoer  $\hat{\mathcal{B}}(0)$ .

La stabilisation robuste optimale, dans ce cadre, est liée à celle obtenue par Georgiou et Smith dans le cadre  $L^2$ , la régulation optimale repose sur la résolution de problèmes d'optimisation dans  $L^1$ . Nous avons résolu quelques problèmes généraux d'optimisation dans  $L^1$  et donné un algorithme pour la résolution du problème de contrôle robuste optimal pour une large classe de systèmes à retards.

Nous considérons à présent, dans le même contexte de contrôleurs à deux degrés de liberté, le contrôle

robuste de systèmes à retards dont la sortie est mesurée par un capteur de type tout-ou-rien. Cela représente la situation déjà évoquée de régulation de richesse (le retard est dû aux quatre temps du moteur et au temps de transfert des gaz jusqu'à la sonde).

### 3.3 Modélisation de phénomènes électrochimiques, application aux sondes de richesse des gaz

*Participants* : Jacques Henry, Ahmed Ketfi-Cherif, Michel Sorine, Jean-Pierre Yvon

Nous avons évoqué plusieurs fois ces sondes qui sont, ainsi que le pot catalytique, un élément fondamental des systèmes de dépollution des moteurs thermiques. Elles sont constituées essentiellement d'une paroi perméable à l'oxygène sous forme ionisé : en gros, une différence de pression partielle d'oxygène de part et d'autre de la paroi (d'un côté l'air, de l'autre les gaz d'échappement) crée un courant de diffusion dans la paroi qui, du fait de l'ionisation, s'accompagne d'un courant électrique que l'on peut mesurer. Ce courant est très vite saturé : cette sonde à d'oxygène se comporte comme un capteur "tout-ou-rien".

Comprendre le fonctionnement de ces sondes et le modéliser est important pour les problèmes de commande et de surveillance/diagnostic.

L'étude a porté sur plusieurs points : début de l'étude fine des phénomènes d'électrochimie prenant place dans la paroi; modélisation du couplage avec les réactions chimiques côté gaz d'échappement (phénomènes très proches de ceux que nous avons étudiés dans le cas du pot catalytique); étude du comportement thermique. Ces travaux sont faits en coopération avec F. Aimard de Renault.

### 3.4 Applications du traitement du signal au génie biomédical

#### 3.4.1 Modélisation de la régulation du rythme cardiaque par le Système Nerveux Autonome (SNA)

*Participants* : Jean Clairambault, Georges Le Vey, Michel Sorine, Christophe Vermeiren

La modélisation du système cardio-vasculaire et de son contrôle à court terme par le SNA s'est poursuivie. À partir d'une revue des modèles existants, nous avons conçu un modèle non linéaire simple. Ce modèle a fait l'objet d'une analyse par la méthode du premier harmonique afin de mieux comprendre les caractéristiques des oscillations propres de ce système et l'influence des paramètres. L'origine de ces oscillations est la non linéarité "tout-ou-rien" de barorécepteurs qui sont dans une boucle de régulation. Cette situation est très proche de celle de la régulation de richesse des gaz à l'aide d'une sonde lambda. Les simulations ont montré que ce modèle approche déjà de manière satisfaisante le comportement du système réel. L'étape suivante sera l'identification des paramètres de ce modèle sur des données réelles. L'état présent du modèle est décrit dans la thèse de doctorat (Génie Biologique et Médical) de C. Vermeiren. L'adjonction à ce modèle d'aspects purement mécaniques est actuellement à l'étude, dans le but de prendre en compte le retour veineux (effets des variations de la pression veineuse centrale sur le débit cardiaque) et sa modulation directe (mécanique locale, et non plus nerveuse centrale) par la respiration. Ces modifications à venir du modèle se feront en liaison avec D. Claude (Université Paris-Sud), avec G. Le Vey (École des Mines de Nantes), co-directeur du travail de thèse de C. Vermeiren, et avec des physiologistes du système cardio-vasculaire (INSERM, hospitaliers).

#### 3.4.2 Méthodes de traitement du signal et des données pour l'étude de la régulation du rythme cardiaque par le SNA

*Participants* : Julie Bestel, Jean Clairambault, Claire Médigue, Georges Le Vey, Christophe Vermeiren

1.- Méthodes temps et temps-fréquence :

La Démodulation Complexe Modifiée (DCM), la Transformation de Pseudo Wigner-Ville Lissée (TPWVL), la Transformation en Ondelettes Dyadique (TOD) et la TPWVL croisée, à l'étude l'an

dernier, ont fait l'objet de plusieurs applications cliniques ou physiologiques.

La DCM a été appliquée aux rythmes cardiaque et respiratoire : en physiologie, elle a été comparée à la méthode du spectre de phase moyenné et à celle de la corrélation croisée des dérivées, sur des données cardiorespiratoires d'adultes respirant à fréquences et volumes variables (collaboration avec l'hôpital A. Bécère, Pr. Escourrou). En pédiatrie, elle a été utilisée pour évaluer le retentissement des carences en fer sur le développement du SNA (projet franco-chilien ECOS, Dr. Peirano). La TOD est appliquée à l'étude des variabilités du rythme cardiaque de nourrissons, en fonction des états de sommeil sur les mêmes données. La TPWVL a été utilisée pour mesurer les changements d'état du SNA au cours de tests orthostatiques (collaboration avec l'INSERM, U127, B. Swynghedauw, avec le centre de rythmologie de l'hôpital Lariboisière, Ph. Coumel et avec l'hôpital Sacco de Milan, A. Malliani). La TPWVL croisée a été appliquée à des enregistrements électro-encéphalographiques (EEG) de profondeur, pour évaluer l'activité  $\gamma$ , impliquée dans les phénomènes de vigilance (collaboration avec le LENA, hôpital de la Pitié-Salpêtrière, F. Varela). La TPWVL croisée a été appliquée également à des signaux électrodermaux, dont les modifications reflètent la vigilance et l'émotivité, pour évaluer la réactivité des chauffeurs à la mise de leur bus en guidage semi-automatique (collaboration débutante avec le Département Biomédical de Renault). Une méthode de détection des mouvements corporels anormaux (syndrome des Myoclonies) est implémentée dans un logiciel dédié aux pathologies du sommeil (projet européen Telematics).

## 2.- Méthodes non linéaires et méthodes fractales :

L'étude de séries expérimentales de rythme cardiaque (RR) s'est poursuivie, en collaboration avec l'Unité 127 de l'INSERM et une équipe de physiologistes et ingénieurs allemands de Iéna (cf. *Programmes bilatéraux de collaboration scientifique*). Ces séries sont étudiées sous deux aspects :

- sous l'hypothèse de l'existence d'un système dynamique discret  $\mathbf{RR}_{n+1} = F(\mathbf{RR}_n)$ , où  $\mathbf{RR}_n = (RR_n, RR_{n-1}, \dots, RR_{n-d})$  possédant un attracteur sensible aux variations du SNA, on estime des caractéristiques statistiques globales de cet attracteur (dimension de corrélation, exposants de Lyapounov, entropie approchée, prédiction non-linéaire) ;
- en considérant le signal RR comme un objet fractal, on examine ses propriétés de régularité locale soit par des transformations temps-échelle, (l'aspect temporel est conservé), soit par des mesures de spectre fractal (l'irrégularité en un point est mesurée par un exposant de Hölder à différentes échelles, et moyennée sur l'ensemble de la série des RR). Ce dernier aspect a été étudié dans le travail de stage de DEA de Julie Bestel, encadré en commun avec le projet FRACTALES (cf. le rapport d'activité de ce projet).

### 3.4.3 LARY\_C : logiciel d'analyse des rythmes physiologiques et de leurs inter-relations

*Participants* : Julie Bestel, Claire Médigue, Christophe Vermeiren

LARY\_C, initialement centré sur l'étude du Rythme Cardiaque, s'est ouvert à l'étude en parallèle et la mise en relation des signaux physiologiques enregistrés simultanément : électrocardiogramme, respiration, pression artérielle, mouvements, électro-encéphalogramme.

LARY\_C est écrit dans le langage synchrone *SIGNAL* pour répondre à la nécessité de décrire des relations de synchronisation complexes entre les différents rythmes issus des signaux physiologiques étudiés.

LARY\_C propose des applications médicales ciblées et facilement modifiables sur la base de méthodes de traitement du signal en bibliothèque : par exemple, étude du retentissement de pathologies du sommeil (apnées du sommeil ou syndrome des mouvements périodiques nocturnes) sur le rythme cardiaque et la pression artérielle, étude des interactions cardio-respiratoires dans des épreuves physiologiques de courte durée, étude de la réactivité cardiaque à la motilité corporelle ...

LARY\_C est avant tout un logiciel de recherche méthodologique et applicative : le développement

méthodologique concerne l'évaluation de méthodes générales de traitement du signal, dans les domaines spectral, temporel et temporo-fréquentiel ; le développement de ces méthodes est motivé par un domaine d'application dominant : l'étude du système nerveux autonome (SNA). Le développement applicatif concerne l'élargissement de l'éventail des signaux traités avec l'introduction à l'étude des signaux électro-encéphalographiques, des mouvements oculaires et des signaux électro-dermaux.

### 3.4.4 Modélisation et étude de phénomènes d'interaction en électrophysiologie cardiaque

*Participants* : Jacques Henry, Mayer Landau

Nous nous sommes attachés à éclaircir un certain nombre de résultats expérimentaux, en électrophysiologie cardiaque, qui montrent la possibilité de coexistence dans une cellule myocardique, de deux potentiels d'équilibre stables. Cette situation pathologique est intéressante, en ce qu'elle permet d'expliquer certaines arythmies ventriculaire.

Notre étude utilise les méthodes de continuation-bifurcation sur deux types de modèles de génération du potentiel d'action cardiaque : le modèle de Van Capelle et Dürer à deux variables d'état et celui plus physiologique de Luo-Rudy détaillant les courants ioniques transmembranaires. Le paramètre par rapport auquel on classe le comportement des modèles est un courant transmembranaire constant, rendant compte d'une situation classique en cas d'ischémie cardiaque. On montre l'existence dans une zone de valeurs du paramètre de solutions stationnaires multiples, deux stables et une instable. Dans le cas du modèle de Van Capelle la solution instable est un col dont la direction attractive joue le rôle de séparatrice des bassins d'attraction des deux solutions stables. On peut ainsi établir des règles de passage d'un potentiel d'équilibre observable à un autre.

Il serait également intéressant d'étudier le comportement de ces modèles par rapport à des variations de la concentration externe de potassium, ce qui correspond à une situation importante en pathologie cardiaque.

## 3.5 Méthode d'Adéquation Algorithme Architecture pour la commande et le traitement du signal en temps réel

*Participants* : Christophe Berge, Thierry Grandpierre, Rémy Kocik, Christophe Lavarenne, Valérie Lecoq, Yves Sorel, Annie Vicard

### 3.5.1 Contexte

Nous étudions les problèmes posés par l'implantation sous contraintes temps-réel, d'algorithmes de contrôle commande et de traitement du signal et des images, s'exécutant sur des architectures embarquées *multi-composants*.

Nous proposons une méthodologie appelée "Adéquation Algorithme Architecture" (A<sup>3</sup>), basée sur des modèles de graphes autant pour spécifier l'algorithme (mise en évidence du parallélisme potentiel) et l'architecture matérielle (mise en évidence du parallélisme disponible), que pour décrire l'implantation en termes de transformations de graphes (réduction de parallélisme). L'adéquation est un problème d'optimisation qui consiste à choisir parmi les implantations possibles une qui respecte les contraintes temps réel et minimise les ressources matérielles utilisées. Le résultat de l'implantation est un exécutif distribué, supportant l'exécution temps réel de l'algorithme sur l'architecture, construit à partir d'une bibliothèque de primitives portables qui constituent le *noyau d'exécutif SynDEX*, soit pour des processeurs, soit pour des circuits intégrés reconfigurables (FPGA).

Deux axes de recherche sont explorés, le premier concerne les modèles d'algorithme, d'architecture, d'implantation et d'exécutif, le second concerne les problèmes d'optimisation liés au concept d'Adéquation Algorithme Architecture.

Le logiciel d'aide à l'implantation SynDEx est développé en même temps que la méthodologie, et les deux sont utilisés par des universitaires et des industriels. En particulier, pour des applications embarquées dans le domaine de l'automobile, nous étudions en collaboration avec le projet Praxitèle, les problèmes de contrôle commande de véhicules urbains électriques, en vue de minimiser l'électronique et l'informatique embarquées, ainsi que leur temps de développement.

### 3.5.2 Activités en 1996

**A<sup>3</sup> et le co-design de systèmes temps réel pour l'automatique :** la méthodologie proposée tente de répondre au problème du "co-design" (développement conjoint logiciel matériel) depuis le niveau de la spécification, où les architectures sont virtuelles, jusqu'au niveau de l'implantation, où les architectures matérielles sont construites avec des processeurs et des circuits intégrés reconfigurables, eux-mêmes conçus et réalisés selon cette méthodologie. Le domaine de l'automobile, avec les futurs systèmes de commande d'organes à travers un réseau informatique, offre un bel exemple de co-design de système d'automatique embarqué. Un exemple de co-design "algorithme de commande/architecture du système informatique" est étudié avec Praxitèle (commande d'un Praxicar de deuxième génération à travers le bus CAN). Un exemple de co-design "architecture de système/processeur spécialisé" est étudié dans le cadre de la collaboration avec le consortium PUMA. Voir les actions industrielles.

**Modèle d'algorithme :** nos travaux sur les modèles de graphes de dépendances factorisés ont été généralisés pour inclure le modèle flot de données conditionné. Dans le cadre du projet Synchrone (CP2I et groupement de recherche C2A) et du projet EUREKA SYNCHRON, nous avons participé à la spécification d'outils servant à manipuler le format commun flot de données conditionné déclaratif "DC".

**Modèle d'architecture :** le modèle *multi-composant* a été utilisé pour spécifier des multi-processeurs construits à partir de Transputers T9000, de processeurs de traitement du signal TMS320C40 et ADSP21060, de microcontrôleurs MC68332, i80C196, RTX2000, de processeurs i80386, et de circuits intégrés reconfigurables XILINX. Ce modèle a été aussi utilisé pour étudier la production automatique des parties "data-path" aussi bien que "control-path" de circuits intégrés reconfigurables sous la forme d'un programme VHDL synthétisable.

**Modèle d'exécutif :** le nouveau modèle d'exécutif mis au point l'an dernier a été utilisé pour réaliser les noyaux d'exécutif des processeurs cités au paragraphe précédent.

**Heuristiques d'optimisation :** notre heuristique rapide de type "glouton", qui permet d'optimiser les performances temps-réel de l'implantation d'un algorithme sur une architecture, a été améliorée pour permettre le routage parallèle de communications simultanées entre deux processeurs. Par ailleurs, une spécification détaillée orientée objet a été réalisée en vue de faciliter les extensions et le portage de l'heuristique.

**Logiciel d'aide à l'implantation SynDEx :** la version V4 de SynDEx a été terminée et distribuée. Elle génère des exécutifs avec allocations totalement statiques (communications ordonnancées, gestion mémoire, synchronisation calculs-communications), dans un macro-code intermédiaire indépendant des jeux d'instructions des processeurs. Les macros traduisant les primitives du noyau d'exécutif sont simples à coder (pour la plupart, quelques instructions seulement) et donc introduisent de très faibles surcoûts (espace mémoire code et données et temps d'exécution) sur tous les processeurs pour lesquels elles ont été codées.

**SynDEx dans le silicium :** afin de pousser à l'extrême la minimisation des ressources supportant l'exécutif et ses interactions avec le séquenceur d'opérations arithmétiques et logiques (CPU), nous avons étudié la faisabilité d'un microcontrôleur intégrant dans le silicium les primitives du noyau d'exécutifs de SynDEx. Une spécification au niveau RTL de l'architecture de ce processeur a été définie. Elle sera utilisée en 1997 pour réaliser en collaboration avec l'IEF (Paris XI, Orsay) un simulateur VHDL du processeur, puis une version sur circuit reconfigurable.

## 4 Action industrielles

### 4.1 Accord-cadre Inria-Renault

Renault et l’Inria ont signé, en janvier 96, un accord de coopération d’une durée de quatre ans. Automatique et électronique embarquée sont les deux domaines de recherche concernés. Les travaux permettront de réduire la consommation et la pollution tout en augmentant la sécurité et le confort des véhicules.

Plusieurs projets Inria participent actuellement, dans ce cadre, à des actions en Automatique (PRO-MATH, SIGMA2, SOSSO). D’autres devraient intervenir dans des actions en informatique temps réel. Les applications “automobile” décrites dans ce rapport sont étudiées dans ce cadre.

### 4.2 Modélisation, identification, commande d’un moteur à combustion interne

*Participants* : Kamal Aouchiche, Pierre-Alexandre Bliman, Catherine Bonnet, Ahmed Ketfi-Cherif, Eric Le Tinier, Shengwen Li, Michel Sorine

L’objectif est la réduction de la pollution des véhicules à essence et la surveillance temps réel permanente du système de dépollution. Il est imposé par les futures normes anti-pollution.

La coopération avec la Direction de la Recherche de Renault (F. Aimard) a continué dans plusieurs directions : régulation de richesse des gaz d’échappement, études des modèles de pots catalytiques et de sondes de richesse; étude du phénomène de “mouillage de parois” (modélisation et commande du dépôt d’essence sur les parois des tubulures d’admission). Une thèse démarre, en partie sur ce dernier sujet (A. Ketfi-Cherif).

### 4.3 Modélisation du contact pneumatique/sol et applications

*Participants* : Pierre-Alexandre Bliman, Pedro Rodriguez, Michel Sorine, Joël Szymanski

Le travail de modélisation mathématique du contact pneu/sol pour les applications à l’automatique continue (sujet de thèse de J. Szymanski, Direction de la Recherche de Renault). C’est une application des travaux sur l’hystérésis et le frottement. Un véhicule est maintenant instrumenté. Plusieurs expérimentations ont été menées pour commencer à valider les modèles. Plusieurs applications sont envisagées : simulateurs de comportement routier, dimensionnement de directions assistées, directions assistées électriques, surveillance de l’adhérence. Un premier essai prometteur d’utilisation des nouveaux modèles a été fait sur ce dernier point (stage de P. Rodriguez).

### 4.4 Modélisation de groupes moto-propulseurs et applications

*Participants* : Hélène Cima, François Maillard, David Maurel, Pierre Ravier, Michel Sorine

C’est une nouvelle action. Il s’agit, toujours dans le cadre de la coopération avec Renault, de modéliser et commander l’ensemble moteur (essence ou Diesel) et boîte automatique (hydraulique ou à courroie). Nous avons deux objectifs pour ce contrôle global du groupe moto-propulseur :

- Réduction de la pollution et de la consommation des véhicules à essence ou Diesel. On envisage en particulier l’utilisation de boîtes de vitesse à rapport continu (CVT), dont l’étude a commencé. Cette approche semble particulièrement utile pour certains moteurs (Diesel ou essence mélange pauvre). C’est le sujet de thèse de H. Cima.

- Stop&Go. Conduite assistée dans certaines phases de conduite (embouteillages, . . .). C’est le sujet de thèse de D. Maurel.

Nous avons commencé par une étude commune aux deux objectifs : modélisation et contrôle du comportement longitudinal en tout point du plan vitesse-roues/couple-roues.

Le problème vient de cycles limites sur les passages de rapport (“pompage”) qui peuvent apparaître dans certaines conditions et du comportement du contact pneu/sol aux basses vitesses.

## 4.5 Participation à l'action Praxitèle

*Participants* : Pascal Daviet, Rémy Kocik, Christophe Lavarenne, Yves Sorel, Michel Sorine

- P. Daviet étudie le problème de l'accrochage sans lien matériel des Praxicar (les véhicules électriques utilisés dans Praxitèle).
- SynDEx est utilisé pour programmer les algorithmes de contrôle commande et de traitement du signal et pour optimiser l'architecture multi-processeur (cinq MC68332, un i80C196, un i80386 reliés par le bus automobile Can) de la seconde génération de prototype de véhicule électrique urbain Praxicar.

## 4.6 Collaborations avec des industriels sur les applications de SynDEx

*Participants* : Christophe Lavarenne, Yves Sorel, Annie Vicard

- Consortium PUMA (sociétés TRIO, IDS et C2ES) : une évaluation de SynDEx pour la programmation de machines multi-microcontrôleur RTX2000 d'Harris a commencé dans le cadre d'une application de traitement d'images temps réel en collaboration avec l'ENSAM de Cluny.
- Castor Technologies : un noyau d'exécutif SynDEx adapté au processeur de traitement du signal ADSP21060 (Sharc) d'Analog Device a été développé pour programmer leur calculateur CX9101 comportant douze Sharcs qui communiquent par des liens point-à-point et multi-point. SynDEx sera proposé comme environnement de programmation pour ces calculateurs.
- Steria Méditerranée : dans le cadre de ses développements exploratoires sur les Langages Synchrones effectués pour la DGA, une évaluation de la version V4 de SynDEx a été réalisée sur une application sonar s'exécutant sur un réseau de TMS320C40 de Texas Instrument.
- Thomson : une première version d'un projet commun avec Simulog, appelé ARCHITEX, d'environnement pour le dimensionnement d'applications embarquées, a été proposée dans le cadre d'un appel d'offre Esprit HPCN (High Performance Computer Networking). Le projet n'ayant pas été retenu, Thomson souhaite que nous collaborions avec eux sur les thèmes du RASSP (Rapid Prototyping of Application Specific Signal Processing) et du Co-design. SynDEx sera utilisé dans le cadre des développements effectués par Thomson TCO (optronique) sur des architectures multi-DSP.
- Snecma : une évaluation de l'interface entre le langage SIGNAL et SynDEx développée en collaboration avec le projet EP-ATR de l'IRISA, est en cours de réalisation sur une application de contrôle de moteur d'avion.

## 4.7 Projet EUREKA SYNCHRON

*Participants* : Christophe Lavarenne, Yves Sorel

Yves Sorel est responsable des travaux effectués par l'INRIA Rocquencourt dans le cadre du projet EUREKA SYNCHRON, labellisé en 1994. Ces travaux sont principalement centrés autour de la normalisation du format commun Synchrone, de l'optimisation d'exécutifs temps réel distribués et du "co-design" (compromis câblé/programmé).

## 4.8 Commande de structures vibrantes

*Participants* : Michel Sorine, Victor Zhuravlev

Cette étude, commandée par la DRET, portait sur les bases théoriques d'un nouveau type de gyroscopes : le gyroscope vibrant. Son principe repose sur la différence de comportement entre ondes et matière dans une structure vibrante en mouvement : la mise en mouvement de la matière n'entraîne pas

parfaitement les modes de vibrations. Pour certaines formes, un mode de vibration peut rester immobile dans un repère inertiel, malgré le mouvement. Entretenir les vibrations et observer leur déplacement dans un repère lié à la structure en mouvement peut donc donner une information de position (mode gyroscope). Réguler la position de la vibration dans le repère lié peut conduire à une information de vitesse de rotation (mode gyromètre). Le pendule de Foucault est une illustration du mode gyroscope. Les structures vibrantes actuelles ont des formes variées (barreau, hémisphère, . . . ) présentant en général un mode double de vibration très peu amorti. On est proche, théoriquement, de l'oscillateur harmonique dans le plan (pendule à deux ddl). Ces gyroscopes, très robustes, ont potentiellement une large gamme d'applications : applications civiles (automobile, électronique grand public) utilisant des gyroscopes bas de gamme, jusqu'à certaines applications militaires.

## 5 Actions nationales et internationales

### 5.1 Actions nationales

#### 5.1.1 ACC-SV

*Participants* : Julie Bestel, Jean Clairambault, Jacques Henry, Claire Médigue, Christophe Vermeiren

Actions Concertées Coordonnées, Sciences du Vivant (1995-1997), ACC-SV n° 9 Intitulé : Physiopathologie et Pharmacologie Cardiovasculaires.

Titre du projet : "Une nouvelle cible pharmacologique : la variabilité du rythme sinusal. Nouvelles méthodes d'analyse spectrales et non linéaires, applications expérimentales et cliniques, relations avec le phénotype myocardique." Collaboration INRIA-U127INSERM (Dr. Swynghedauw, Hôpital Lariboisière)

#### 5.1.2 GDR TDSI

Yves Sorel est responsable du groupe de travail GT6 : Adéquation Algorithme Architecture du PRC-GDR ISIS "Informations Traitement du Signal Images".

#### 5.1.3 Séminaire META2-SOSSO

Catherine Bonnet est responsable de l'organisation de ce séminaire.

### 5.2 Actions internationales

#### 5.2.1 Programmes bilatéraux de collaboration scientifique

*Participants* : Julie Bestel, Jean Clairambault, Jacques Henry, Claire Médigue, Christophe Vermeiren

- Programme TELEMATICS, European Neurological Network (début novembre 1995); le projet SOSSO intervient dans la partie algorithmique traitement du signal des enregistrements polysomnographiques.
- Programme Franco-Chilien ECOS (1993-10/1996), INRIA / Université du Chili : "Etude des interactions entre les rythmes cardiaque et respiratoire et de leur régulation par le système nerveux autonome".
- Programme Franco-Allemand PROCOPE (N° 96147, INRIA, Université Friedrich-Schiller, Iéna, Allemagne, et INSERM U 127, Hôpital Lariboisière, Paris) : "Estimation quantitative de paramètres déterministes de type chaotique sur des séries temporelles physiologiques". Programme en cours sur 1996, renouvellement demandé pour 1997.

## 5.2.2 Réseaux HCM

*Participants* : Jacques Henry, Jean-Pierre Yvon

Participation au réseau HCM "Control of partial differential equations and applications" dirigé par E. Casas de l'université de Santander.

# 6 Diffusion des résultats

## 6.1 Actions d'enseignement

### 6.1.1 Enseignements universitaires

- P.-A. Bliman : chargé de TD du cours de "Systèmes linéaires" de l'ENSTA et du cours "Commande linéaire des systèmes dynamiques" de l'ENSMP.
- J. Clairambault est chargé de TD des cours "analyse mathématique" (MA 103) et "algorithmique numérique" (IA 101) à l'ENSTA. Il a réintégré l'Éducation Nationale en étant nommé au 1<sup>er</sup> septembre 1996 PRAG à l'Université Paris VIII ; il poursuit son activité de recherche à l'INRIA comme collaborateur extérieur au sein du projet SOSSO.
- Y. Sorel : cours "Spécification et Implantation des Systèmes Temps Réel", École d'ingénieurs ENSTA, Paris.
- Y. Sorel : cours "Algorithmes et Architectures pour le Traitement du Signal en Temps Réel", École d'ingénieurs ESIEE, Noisy-le-Grand.
- Y. Sorel : cours "Adéquation Algorithme Architecture", DEA Orsay "Systèmes électroniques de traitement de l'information"

### 6.1.2 Séminaires et formation permanente

- P.A. Bliman : Modèles de frottement sec pour l'automatique, séminaire de l'UTC
- Dans le cadre de la collaboration avec l'U127-INSERM, suivi et développement d'applications dans LARY\_C; formation en particulier d'un ingénieur de l'UTC de Compiègne à la gestion globale de l'application médicale.
- Dans le cadre du projet ECOS, formation à l'utilisation de LARY\_C en vue d'une prochaine mise à disposition à l'INTA de Santiago du Chili.
- J. Clairambault, D. Claude : Systèmes dynamiques et biologie : quelques exemples, Conférence à l'ENSTA (mai 96) pour les professeurs de Mathématiques Spéciales, Séminaire de formation (ENSTA-UPS) aux TIPE sur les systèmes dynamiques. Document ENSTA.
- C. Lavarenne et Y. Sorel : nombreuses sessions de formation au logiciel SynDEx

## 6.2 Organisation de colloques et de cours

Yves Sorel a organisé, du 17 au 19 janvier 1996, le colloque AAA96 (Adéquation Algorithme Architecture en traitement du signal et des images) au CNES Toulouse.

### 6.3 Diffusion de logiciels

- Une mise à disposition de LARY\_C a été effectuée à l'école des Mines de Nantes (G. Le Vey).
- Cinquante mises à disposition de SynDEx ont été effectuées les années précédentes. Cette année, de nombreuses mises à jour pour la version V4 ont été effectuées ainsi que de nouvelles mises à disposition pour des industriels : SNECMA Moissy Cramayel, STERIA Méditerranée, Consortium TRIO-IDS-C2ES Bourgogne, ainsi que pour des universitaires : école INSA Rennes, laboratoire Cephag INPG Grenoble

Un serveur Web présentant SynDEx est disponible à l'URL : <http://www-rocq.inria.fr/syndex>.

## 7 Publications

### Thèses

- [316] S. LI, *Modélisation de pots catalytiques et de sondes de richesse. Application à la commande des moteurs à essence dépollués*, thèse de doctorat, Université de Paris Dauphine (Paris IX), 1996, Thèse en mathématiques et automatique.
- [317] C. VERMEIREN, *Analyse et modélisation du système cardio-vasculaire et sa régulation à court terme par le système nerveux autonome*, thèse de doctorat, Université de Paris Val de Marne (Paris XII), 1996, Thèse en Génie Biologique et Médical.

### Articles et chapitres de livre

- [318] F. AIMARD, S. LI, M. SORINE, «Mathematical modeling of automotive three-way catalytic converters with oxygen storage capacity», *Control. Eng. Practice* 4, 8, 1996, p. 1119–1124.
- [319] J.B. CHOQUEL, J.P. DUBUS, Y. SOREL, «Implantation VLSI de l'échantillonnage d'un contour à l'aide d'une spécification flot de données conditionnée», *Traitement du Signal*, À paraître 1996.
- [320] J.I. DIAZ, J. HENRY, A. M. RAMOS, «On the approximate controllability of some semilinear parabolic boundary value problems», *Journal of Applied Mathematics and Optimization*, À paraître.
- [321] M. LANDAU, P. LORENTE, «Conduction block and chaotic dynamics in an asymmetrical model of coupled cardiac cells», *Theoretical Biology*, 1996, en cours de révision.
- [322] P. MANSIER, J. CLAIRAMBAULT, N. CHARLOTTE, C. MÉDIGUE, C. VERMEIREN, G. LE PAPE, F. CARRÉ, A.GOUNAROPOULOU, B. SWYNGHEDAUF, «Linear and Non-Linear analyses of Heart Rate Variability: a Minireview», *Cardiovascular Research*, 31, 1996, p. 371–379.
- [323] P. MANSIER, C. MÉDIGUE, N. CHARLOTTE, C. VERMEIREN, E. CORABOEUF, E. DEROUBAI, J. C. F. CARRÉ, T. DAHCLI, B. BERTIN, P. BRIAND, D. STROSBERG, B. SWYNGHEDAUF, «Decreased heart rate variability in transgenic mice overexpressing atrial  $\beta$ 1-adrenoreceptors», *American Journal of Physiology*, 1996, sous presse.
- [324] T. MAURIN, Y. SOREL, E. ZERGAINOH, «An Architecture for an efficient multiprocessor development environment: the fast distributed executive for reactive system», *Journal of Systems Architecture: The Euromicro Journal*, À paraître.
- [325] B. SWYNGHEDAUF, S. JASSON, B. CHEVALIER, J. CLAIRAMBAULT, S. HARDOUIN, C. HEYMESAND, L. MANGIN, P. MANSIER, C. MÉDIGUE, J.M. MOALIC, N. THIBAUT, F. CARRÉ, «Heart Rate and Heart Rate Variability, a pharmacological target», *Cardiovascular Drugs and Therapy*, 1996, sous presse.

## Communications à des congrès, colloques, etc.

- [326] C. ALLAL, S. ABDU, P. DAVIET, M. PARENT, «Tactical and Technical Routing of Empty Vehicles in the PRAXITELE Project», in : *Proceedings of 4th IEEE Symposium on Control and Automation*, Crete, Greece, June 10-14th 1996.
- [327] C. BONNET, J.R. PARTINGTON, «Robust BIBO stabilization: Control of a delay integrator», in : *MTNS*, St. Louis, 24-28 June 1996.
- [328] C. BONNET, J.R. PARTINGTON, «Robust control of a delayed integrator in a BIBO framework», in : *HCM workshop Control of Infinite-Dimensional Systems*, University of Bath, 15-18 April 1996.
- [329] C. MÉDIGUE, C. VERMEIREN, M. GARRIDO, M. PEÑA, P. PEIRANO, «Assessment of autonomic dysfunction in iron-deficient anemic infants by cardio-respiratory demodulation», in : *Actes de la 18<sup>e</sup> conférence internationale annuelle de l' IEEE Engineering in Medicine and Biology Society*, Amsterdam, 31 oct. - 3 nov. 1996.
- [330] P.A. BLIMAN, A.M. KRASNOSEL'SKII, «Periodic solutions of linear systems coupled with relay», in : *Proc. of 2nd World Conf. on Nonlinear Analysis*, Athens (Greece), July 10-17 1996.
- [331] P.A. BLIMAN, M. SORINE, «Dry friction models for automatic control», in : *Proc. of Euromech Colloquium 351: Systems with Coulomb friction*, Vadstena (Sweden), August 5-7 1996.
- [332] P.A. BLIMAN, M. SORINE, «On a model of dry friction», Workshop Models of hysteresis, Levico (Italy), June 25-29 1996.
- [333] C. VERMEIREN, G. LE VEY, «Analysis of a nonlinear time-delay model of the cardiovascular system and its short-term control», in : *18th international annual IEEE Engineering in Medicine and Biology Society Conference*, Amsterdam, 31 oct. - 3 nov. 1996.
- [334] C. VERMEIREN, G. LE VEY, «Short term autonomic nervous control of the cardiovascular system: a nonlinear low-dimensional model», in : *2nd IMIA-IFBME International workshop on biosignal interpretation*, Kanagawa, Japon, 23-28 septembre 1996.

## Rapports de recherche et publications internes

- [335] J. BESTEL, *Analyse multifractale: Une nouvelle définition du Spectre des Grandes Déviations, application à des données biomédicales*, Mémoire, ENS Cachan, 1996, Rapport de stage de DEA MIA (mathématiques et intelligence artificielle).
- [336] C. BONNET, J.R. PARTINGTON, «Bezout factors and  $L^1$ -Optimal controllers for delay systems using a two-parameter compensator scheme», *Rapport de Recherche n°3023*, Inria, 1996, soumis à IEEE TAC.
- [337] A. KETFI-CHERIF, *Modélisation des sondes à oxygène*, Mémoire, École Centrale de Lyon et U. de Lyon, 1996, Rapport de stage de DEA d'Automatique.
- [338] V. ZHURAVLEV, «Vibration contrôlée de structures», *Rapport de fin de contrat*, Inria, 1996, Opération DRET n° 95/81100051.

## Divers

- [339] F. AIMARD, M. SORINE, «Procédés de surveillance du fonctionnement et du vieillissement d'un pot catalytique de véhicule automobile et procédé de commande du moteur d'un véhicule équipé d'un tel pot», 18 mars 1996, Brevet n° 9603350.
- [340] E. LE TINIER, «Compensation du mouillage de parois dans les moteurs à injection indirecte», Rapport de fin d'étude, ESIEE, janvier-juin 1996.
- [341] F. MAILLARD, P. RAVIER, «Modèles d'hystérésis et application à la modélisation et à la commande d'une boîte de vitesse à variation continue», Rapport de stage, École polytechnique, 15 avril - 4 juillet 1996.

- [342] L. MEYER, «Portage et adaptation d'une méthode d'analyse du rythme cardiaque, basé sur l'utilisation du logiciel LARY\_C de traitement du signal», Rapport de stage de fin d'études à l'UTC de Compiègne, en Génie Informatique, effectué dans le cadre d'une collaboration INRIA-U127INSERM, Février 1996.
- [343] P. RODRIGUEZ, «Modélisation du contact pneu-sol appliquée à l'estimation ou détection d'adhérence», Rapport de stage, Supélec, 1 avril - 28 juin 1996.

## 8 Abstract

This research project is mainly devoted to automatic control theory and applications. Because of the nature of most considered applications, the activity of the project also covers some aspects of signal processing and real-time processing. Research activities concern the following topics :

- Identification and automatic control with applications to automotive control and control of mechanical systems.
- Bio-mathematics with applications to electrophysiology of the heart and diagnosis in cardiology.
- Real-time programming of automatic control and signal processing tasks. Applications are worked out in collaboration with the industry.

