

Rapport INRIA 1994 — Programme 5  
Applications et Outils de l'Automatique

PROJET SOSSO

3 mai 1995



PROJET SOSSO

---

# Applications et Outils de l'Automatique

---

**Localisation :** *Rocquencourt*

**Mots-clés :** commande de processus (1), commande de système mécanique (1), modélisation de système dynamique (1), SOSSO (1), temps réel (1), traitement de signal biomédical (1), traitement du signal (1).

## 1 Composition de l'équipe

### **Responsable scientifique**

Michel Sorine, directeur de recherche, Inria

### **Responsable permanent**

Jacques Henry, directeur de recherche, Inria

### **Secrétariat**

Martine Verneuille

### **Conseiller extérieur**

Jean-Pierre Yvon, professeur, UTC

### **Personnel Inria**

Pierre-Alexandre Bliman, chargé de recherche

Catherine Bonnet, chargée de recherche à partir du 1/10/94

Jean Clairambault, chargé de recherche, détaché de l'Éducation Nationale

Claire Médigue, ingénieur d'étude

Yves Sorel, directeur de recherche

**Personnel CNRS**

Mayer Landau, chargé de recherche, Ura 1323

**Chercheur extérieur**

Christophe Lavarenne

**Chercheurs invités**

Alfonso Ehijo, professeur, Université de Santiago, Chili  
Alexandre M. Krasnosel'skii, professeur, Université de Moscou

**Chercheur post-doctorant**

Catherine Bonnet, boursière Inria jusqu'au 30/9/94

**Chercheurs doctorants**

Frédéric Aimard, Cifre Renault  
Shengwen Li, boursier Inria  
Papa Momar Ndiaye, boursier Inria  
Christophe Vermeiren, boursier HCM

**Stagiaires**

Julie Bestel, ICPI-CPE, Lyon  
Thomas Bonald, École Polytechnique  
Andrzej Borkowski, École franco polonaise des nouvelles technologies de l'information et de la communication  
Frédéric Bravard, Enssat, Lannion  
Nathalie Charlotte, Unité Inserm 127 et Faculté de Médecine de Rennes  
Yann Courties, Eisti, Cergy-Pontoise  
Atem Dohni, École Polytechnique  
Amin Krouma, Université de Paris val-de-Marne  
Valérie Lecoq, IUT Villetanneuse  
Laurent Royer, École Centrale de Lyon

## 2 Présentation du projet

Le projet étudie certains problèmes de mise en œuvre des méthodes de l'Automatique ou du Traitement du signal, en particulier des problèmes amont de modélisation et aval d'informatique temps réel. Ces problèmes se posent souvent simultanément dans le cas d'applications complexes.

Ils peuvent être très liés à l'application (modélisation physique du système, programmation bas niveau du contrôleur ...) ou avoir un caractère assez générique (étude de modèles, de techniques de commande, programmation synchrone de systèmes de traitement du signal ...). Dans tous les cas nous essayons de ne pas les isoler de l'application d'origine qui reste la principale motivation et a un effet structurant sur l'activité. Les domaines d'application sont choisis pour leur importance économique et sociale. Dans ces applications, l'apport de l'Automatique peut être important mais il est conditionné par la résolution de ces problèmes de mise en œuvre.

Notre action consiste donc en :

- des collaborations avec des spécialistes de ces domaines,
- des études méthodologiques inspirées par les problèmes rencontrés.

Nous travaillons actuellement dans les domaines suivants :

- *Automatique et Automobile.* Plusieurs études sont en cours avec Renault : commande et surveillance/diagnostic (en coopération avec le projet AS sur ce dernier point) de moteurs à combustion interne dépollués et modélisation et commande du comportement routier des véhicules.
- *Traitement du signal et génie biomédical.* Electrophysiologie cardiaque : un logiciel, Lary\_C, pour l'analyse du rythme cardiaque a été développé et est utilisé, en collaboration avec l'Inserm, dans plusieurs études cliniques de la régulation du rythme cardiaque par le système nerveux autonome chez l'humain et l'animal transgénique.

Nous avons dégagé des applications précédentes deux catégories de problèmes méthodologiques relevant de l'Automatique et de l'Informatique temps réel et intervenant souvent de façon couplée :

- *La modélisation mathématique, l'identification et la commande :*
  - de systèmes à hystérésis avec application aux problèmes de frottements (modélisation, compensation). Nous rencontrons actuellement de tels problèmes lors de l'étude du contact pneu/sol. L'hystérésis intervient aussi en électrophysiologie cardiaque.
  - 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, commande d'organes à travers un bus multiplexé, ...).

- *La programmation temps réel synchrone d'algorithmes de commande et de traitement du signal :*
  - spécification de traitements multicalendres complexes en utilisant Signal (langage développé à l'Inria Rennes ). Application au traitement de signaux physiologiques 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.

### 3 Actions de recherche

#### 3.1 Modèles d'hystérésis et applications

*Participants :* P.A. Bliman, A.M. Krasnosel'skii, M. Sorine

La principale motivation de ces études est la commande de systèmes mécaniques nécessitant la prise en compte de frottements secs. Les problèmes peuvent être la compensation de ces frottements, à l'origine de limites des performances des régulateurs classiques, ou leur maximisation comme dans le cas d'un système de freinage ABS (voir plus loin la coopération avec Renault sur le contact pneu/sol).

Le point de vue que nous avons adopté est de modéliser ces frottements par des opérateurs d'hystérésis dissipatifs. Nous avons proposé une large classe de tels opérateurs (cf. le rapport d'activité précédent). Cette année nous nous sommes particulièrement intéressés aux techniques d'utilisation de ces modèles en Automatique et à l'étude du comportement qualitatif des systèmes soumis à de tels frottements.

### 3.1.1 Modélisation et compensation de frottements secs

*Participants* : P.A. Bliman, M. Sorine

Les méthodes de compensation efficaces reposant sur une modélisation fine du frottement, nous avons été conduits à proposer 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, effets Dahl et Stribeck. Une bonne représentation du frottement lors de ces transitions est particulièrement importante lorsque le déplacement relatif, origine du frottement, est une erreur d'asservissement de position qui donc oscille autour de 0. Dans ce cas le frottement est en permanence dans la zone de transition et le modèle de Coulomb ( $\text{sgn } \dot{u}$ ) est insuffisant. Le caractère unificateur de la classe de modèles proposée vient du point de vue adopté : on considère qu'un modèle de frottement sec est un opérateur d'hystérésis causal et dissipatif. Il est apparu que deux modèles sont particulièrement intéressants pour les applications :

- Un modèle, avec un état de dimension un, rend compte de l'effet Dahl (comportement élastique pendant les changements de signe de la vitesse) et, asymptotiquement (lorsque la distance parcourue sans changement de signe de la vitesse tend vers l'infini), du comportement décrit par le modèle de Coulomb. Ses paramètres, coefficient de frottement dynamique et raideur pendant les transitions, sont faciles à identifier. Ce modèle est une régularisation du modèle de Coulomb que l'on retrouve lorsque la raideur est infinie. L'avantage par rapport à une régularisée Yosida de  $\text{sgn } \dot{u}$  est que l'on conserve la propriété d'hystérésis importante aux faibles vitesses.
- Un modèle, avec un état de dimension deux, rend compte en outre de la stiction (coefficient de frottement dit "statique" supérieur lors des démarrages au coefficient dynamique de Coulomb) et de l'effet Stribeck, c'est à dire de conditions dans lesquelles une raideur négative apparaît, le frottement pouvant alors diminuer lorsque la vitesse augmente, ce qui est la source de cycles limites (dits de "stick-slip") dans les régulateurs de vitesse pour de faibles vitesses de consigne.

Ces modèles ont été expérimentés dans divers simulateurs chez Renault (direction assistée, freinage, ...). Nous avons étudié comment les

prendre en compte dans la conception de régulateurs. Deux problèmes ont été considérés :

- Réglage d'un régulateur PID de vitesse ou de position en présence de frottements secs. La théorie permet de prévoir les gains à utiliser en fonction des caractéristiques principales du frottement afin d'éviter les cycles limites. On retrouve en particulier les heuristiques connues des ingénieurs.
- Suivi de trajectoire pour un bras de robot. Ce travail mené en collaboration avec R. Nikoukhah et D. von Wissel du projet Meta2, étudie comment combiner commande prédictive et compensation de frottement.

Deux articles soumis à ECC95 rendent compte de ces études.

### 3.1.2 Comportement qualitatif des systèmes à hystérésis

*Participants* : P.A. Bliman, A.M. Krasnosel'skii, M. Sorine

L'étude du couplage des modèles de frottement précédents ou plus généralement de modèles d'hystérésis avec des équations différentielles est intéressante. On rencontre ce type d'équation par exemple pour représenter les petits mouvements d'un système mécanique en présence d'un frottement sec ou de jeu (contact unilatéral entre pièces mobiles) qui est encore un hystérésis. Il est important de comprendre le comportement qualitatif de tels systèmes. Nous avons continué l'étude de leurs solutions périodiques, en collaboration avec A.M. Krasnosel'skii. Cette année nous avons considéré les oscillations forcées et les phénomènes de résonance paramétrique dans les systèmes de la forme

$$L\left(\frac{d}{dt}; \lambda\right)u = M\left(\frac{d}{dt}; \lambda\right)[F_\lambda(u) + b(t; \lambda)]$$

où  $L$  et  $M$  sont des polynômes différentiels,  $F_\lambda$  l'opérateur d'hystérésis,  $b$  le terme de forçage périodique et  $\lambda$  le paramètre.

### 3.2 Commande de systèmes à retards

*Participants* : C. Bonnet, P.M. Ndiaye, M. Sorine

La motivation pour l'étude de ces systèmes vient de problèmes rencontrés dans nos applications automobiles. Les retards interviennent :

- dans l'étude des régulateurs de richesse des gaz d'échappement. Ils sont dus au temps de transfert entre les soupapes d'échappement et la sonde de richesse.
- dans l'étude des pots catalytiques : le phénomène de transport des gaz dans le pot, couplé aux phénomènes chimiques, conduit à un modèle distribué. Une approximation utile pour les applications de commande et de surveillance envisagées a la forme d'une équation différentielle à retard. Ce retard devra être pris en compte lors de l'exploitation des mesures de richesse en sortie du pot.
- dans l'étude de la commande d'organes d'automobile à travers un bus multiplexé. Ici les retards sont dus aux temps d'attente pour accéder au bus et le traverser.

Ces retards peuvent être traités de deux façons :

- Lorsqu'ils sont importants, ils doivent être traités explicitement. C'est ce qui est fait pour le régulateur de richesse des gaz (utilisation d'une variante du prédicteur de Smith).

- Lorsqu'ils sont petits, on peut les voir comme des perturbations d'un système nominal sans retard. On recherche alors la robustesse du régulateur vis-à-vis de ce type de perturbations. Dans cette voie, nous étudions actuellement la sensibilité des performances de contrôleurs LQ et la stabilisation robuste.

Pour ce dernier point nous considérons la stabilisation robuste dans  $L_1$  des systèmes scalaires, en temps continu, à partir de l'étude similaire réalisée en temps discret par C. Bonnet et J. Partington (Université de Leeds). Nous proposons une nouvelle distance dans l'espace des systèmes  $L_1$ -stabilisables qui est d'expression simple et qui induit la topologie du gap (topologie la plus faible pour laquelle la stabilisation par feedback est une propriété robuste). Nous estimons la marge de robustesse relativement à cette distance et considérons le problème d'optimisation de cette marge.

### 3.3 Etude de l'introduction de poids dans le critère d'erreur de problèmes d'identification

*Participants* : J. Henry, J.P. Yvon

L'identification de paramètres de systèmes dynamiques par minimisation de l'erreur de sortie conduit souvent à des problèmes mal posés, et donc instables numériquement. Les recherches menées dans ce domaine

visent à rendre le problème bien posé en introduisant des opérateurs de pondération dans le critère d'erreur. Plus précisément on cherche à obtenir un hessien du problème modifié aussi proche que possible de l'identité.

Lorsque l'opérateur de pondération est local en temps, des équations linéaires déterminant cet opérateur ont été proposées. Des conditions suffisantes garantissant l'existence et la positivité de la solution ont été trouvées. Elles peuvent conduire à des restrictions sur les conditions initiales. Cependant la méthode est toujours applicable si l'on relaxe l'objectif d'amélioration du conditionnement.

Par ailleurs, si l'opérateur de pondération en temps n'est plus local, on obtient un nouveau problème qui a la propriété suivante : la direction du gradient pour ce problème est celle de la méthode de Gauss-Newton pour le problème initial. On montre aussi les liens entre cette approche et la théorie des sentinelles de J.L. Lions.

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

#### 3.4.1 Etude de la régulation du rythme cardiaque par le système nerveux autonome

*Participants* : J. Bestel, J. Clairambault, A. Krouma, M. Landau, C. Médigue, G. Le Vey, C. Vermeiren

Nous étudions le système nerveux autonome (SNA) en collaboration avec l'Inserm CFJ 8909 (Hôpital Antoine Bécclère, à Clamart) et l'unité Inserm 127 (Hôpital Lariboisière, Paris). L'analyse du SNA a de nombreux intérêts en recherche et en clinique car cette partie du système nerveux est impliquée dans la régulation de toutes les fonctions vitales, notamment cardio-vasculaire et respiratoire, pour assurer l'équilibre vital et permettre une adaptation de l'organisme à tout changement d'état. Le fonctionnement du SNA peut être apprécié par les variations du rythme cardiaque et ses corrélations avec d'autres rythmes physiologiques.

**La recherche méthodologique en traitement du signal** s'oriente vers : - les problèmes de détection d'événements utiles sur les signaux bruts (p.ex. les battements cardiaques sur l'ECG) : à ce jour, notre expérience concerne les signaux électrocardiographique, respiratoire, de la pression artérielle et de la motilité corporelle. La détection des pressions artérielles maximale (systolique) et minimale (diastolique), enregistrées

en continu est peu référencée jusqu'à ce jour et a fait l'objet du stage d'A. Krouma.

- l'évaluation et la comparaison d'algorithmes temps-fréquence développés pour l'étude de ces rythmes physiologiques non-stationnaires : transformée de Fourier à court terme (TFCT), transformée de (pseudo-) Wigner-Ville lissée (PWVL), modèles Arma, afin d'apprécier pour chaque signal les bandes d'intérêt physiologique et de les suivre au cours du temps, en fonction des événements liés aux autres signaux. Une version de la transformée de PWVL à partir du signal analytique a été mise au point. Une autre amélioration consistant à reconcentrer l'énergie de cette transformée qui est dispersée par le lissage, a été étudiée : l'énergie dans le plan temps-fréquence est réallouée au centre de gravité de chaque point. La combinaison de ces deux versions de la PWVL a contribué à une meilleure interprétation des spectres.

Une autre approche consiste en une modélisation Armax du rythme cardiaque. Ceci permet d'évaluer l'influence de la respiration sur le rythme cardiaque. Plusieurs méthodes de calcul des coefficients du modèle ont été évaluées.

**Recherches en modélisation :** indépendamment des méthodes d'analyse spectrale ou temps-fréquence, nous étudions des méthodes d'analyse des signaux électrophysiologiques, et avant tout du rythme cardiaque, considérés comme sorties d'un système dynamique déterministe. Des données réelles et des signaux simulés sont utilisés pour cela.

Une partie de l'activité de modélisation consiste en l'étude du modèle de Noma-Irisawa pour le potentiel d'action de la cellule pace-maker du nœud sinusal, avec introduction d'une régulation par le SNA. Cette régulation est représentée par la modification des constantes de temps dans la cinétique des courants ioniques transmembranaires noradrénaline- ou acétylcholine- dépendants. Le rythme cardiaque microscopique qui en résulte, obtenu par mesure des distances successives entre battements ainsi modélisés, est ensuite comparé à des enregistrements réels macroscopiques, dans le but d'établir une caractérisation de l'état du SNA au vu de l'enregistrement du rythme cardiaque.

Une autre modèle, à base d'équations différentielles, non seulement du rythme cardiaque, mais de tout le système cardio-vasculaire et respiratoire (rythme cardiaque, pression artérielle, respiration) et de sa régulation par le SNA, est à l'étude en collaboration avec l'École des Mines de Nantes.

Une autre partie de l'activité de modélisation consiste à conjectu-

rer qu'il s'agit d'un système dynamique déterministe dissipatif. Une caractérisation quantitative de ce système dynamique à partir de ses sorties (les signaux physiologiques observés) est alors possible par la mise en œuvre d'algorithmes estimant les exposants de Lyapounov du système (algorithmes de Wolf et d'Eckmann-Ruelle notamment). Des résultats préliminaires portant sur des séries courtes de rythme cardiaque (1000 points) semblent conforter l'hypothèse d'un système dissipatif. Ces méthodes pourraient également s'appliquer à d'autres signaux provenant d'oscillateurs physiologiques tels que la respiration ou la pression artérielle. Cette partie fait l'objet d'un projet Procope de coopération Franco-Allemande avec l'Université Friedrich-Schiller (Iéna), soumis pour 1995-96.

**Applications.** Un premier domaine d'application concerne l'étude de la maturation du SNA chez des nouveau-nés. Ce travail porte sur l'analyse du rythme cardiaque, en liaison avec les variations d'autres rythmes physiologiques : le sommeil et ses changements de stade, la motricité corporelle, la respiration. Cette étude, appliquée à des bébés normaux, à terme et prématurés, a pour but ultime d'apporter une contribution à l'élucidation du problème de la mort subite inexplicée du nourrisson. Dans un premier temps, des études portant sur des bébés de faible poids de naissance, ou sur d'anciens prématurés arrivés à l'âge du terme, ont permis d'évaluer le retentissement sur le développement du SNA de ces facteurs de risque fréquents. Cette année, on a étudié la réactivité cardiaque au mouvement corporel chez des nouveau-nés à terme en bonne santé, en collaboration avec l'Hôpital Antoine-Béclère (Dr. L. Curzi-Dascalova, CFJ Inserm 8909), Clamart. En pédiatrie également, pour évaluer le retentissement de carences en fer sur le développement du SNA, on étudie les interactions cardio-respiratoires chez des nourrissons et de très jeunes enfants. Cette étude se place dans le cadre d'un contrat franco-chilien Ecos avec l'Université du Chili (Santiago) et l'Inserm.

Un second domaine concerne l'appréciation en temps réel, chez l'adulte, de l'état du SNA. Les applications sont nombreuses : suivi des performances de sportifs, bilans de santé cardiovasculaire, diagnostics de dysfonctionnements du SNA. Ces projets sont élaborés avec l'Hôpital Antoine-Béclère (Pr. P. Escourrou, CFJ Inserm 8909), dans la perspective de la constitution d'un laboratoire du SNA. Cette étude est le thème d'une proposition de contrat soumise à la Dret.

Un troisième domaine concerne l'étude du rythme cardiaque de souris transgéniques, chez qui on a introduit un gène responsable de la produc-

tion en forte quantité de récepteurs adrénergiques, liés à l'activité de la branche sympathique du SNA. On étudie les effets croisés de la transgénécité et de drogues stimulatrices ou inhibitrices des deux branches du SNA (propranolol, atropine, notamment). Cette étude est menée en collaboration avec l'unité Inserm 127, Hôpital Lariboisière, Paris.

### 3.4.2 Lary-C : Logiciel d'Analyse du Rythme Cardiaque et de ses relations avec d'autres rythmes physiologiques

*Participants* : J. Bestel, A. Krouma, C. Médigue, C. Vermeiren

Nous développons un logiciel d'analyse des rythmes, Lary\_C, permettant d'étudier en parallèle et de mettre en relation des signaux physiologiques enregistrés simultanément : électrocardiogramme, respiration, pression artérielle, mouvements. Ce logiciel est écrit dans le langage *Signal*.

Lary\_C propose une analyse des signaux dans les conditions du différé aussi bien que du temps réel : il se prête à des recherches sur banques de données par exemple dans le cadre des études sur des nouveau-nés prématurés; il se prête également au suivi en temps réel des performances de sportifs à l'effort, ou des réactions d'un patient au stress.

Lary\_C propose des applications médicales ciblées et facilement modifiables sur la base des méthodes de traitement du signal qui sont en bibliothèque : par exemple, étude du retentissement des apnées du sommeil 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 a été enrichi par de nouvelles méthodes de traitement du signal (voir plus haut) et on cherche à élargir l'éventail des signaux traités, notamment vers les signaux électro-encéphalographiques ou ceux des mouvements oculaires. Cela suppose de nouvelles collaborations.

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

*Participants* : J. Henry, M. Landau

Dans le cas d'une petite cellule cardiaque pacemaker couplée à une grande cellule non-pacemaker, nous avons obtenu des comportements d'hystérésis et de chaos. L'interprétation en pathologie cardiaque de ces résultats est qu'un petit foyer ectopique entouré d'une grande masse de

tissu non automatique peut engendrer une fibrillation cardiaque. Ceci est original en ce que la plupart des schémas de fibrillation utilisent un autre concept, celui de réentrée. Ces résultats ont été obtenus avec le modèle simplifié de van Capelle et Durrer qui modélise électrophysiologiquement une cellule par deux variables d'état. On travaille à retrouver les principaux résultats en utilisant un modèle plus précis prenant en compte les divers courants ioniques (modèle de Beeler-Reuter et de Luo-Rudy) afin de donner une justification plus physiologique à nos résultats théoriques.

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

*Participants* : F. Bravard, Y. Courties, C. Lavarenne, V. Lecocq, Y. Sorel

#### **3.5.1 Problématique**

Nous étudions les problèmes d'implantation temps-réel, sur des architectures parallèles, d'algorithmes de contrôle commande et de traitement du signal et des images, en vue de réaliser :

- le respect des contraintes temps réel (par répartition de la charge de calcul),
- la prise en compte de la nature distribuée des informations à traiter (entrées-sorties délocalisées, données distribuées),
- la minimisation du nombre de composants de l'architecture matérielle (processeurs programmables et/ou opérateurs câblés),
- le portage aisé des algorithmes sur de nouveaux matériels.

Les méthodes traditionnelles de conception et de mise au point de programmes séquentiels temps réel atteignent aujourd'hui leurs limites pour des programmes parallèles, avec des coûts de développement prohibitifs, principalement engloutis dans la programmation et la mise au point de bas niveau. Nous proposons une méthodologie que nous appelons "Adéquation Algorithme Architecture", 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). Le résultat de ces transformations est un schéma d'exécutif distribué supportant l'exécution temps réel de l'algorithme sur l'architecture. L'adéquation consiste à choisir l'implantation qui respecte au mieux l'ensemble des contraintes décrites

plus haut, ce qui se traduit par un problème d'optimisation.

Deux axes de recherche sont donc 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.

Finalement, pour valider la méthode préconisée, un prototype de logiciel appelé SynDEx, a été développé. Il est adapté au fur et à mesure des avancées méthodologiques.

### 3.5.2 Modèles

**Algorithme.** Il est modélisé par un *Grappe Flot de Données Conditionné* (hypergraphe orienté), dont chaque sommet est une *opération* et chaque arc une *transfert de données* répété conditionnellement à chaque stimulus reçu de l'environnement. Ce modèle permet de décrire des algorithmes réactifs, aussi bien réguliers (traitement d'images) qu'irréguliers, il met en évidence le parallélisme potentiel (ordre partiel induit par les précédences du graphe) et la mémoire d'état de l'algorithme. Les *langages synchrones* Lustre et Signal utilisent ce modèle pour spécifier les algorithmes et permettent de vérifier si l'ordre logique des événements induit par l'ordre partiel conditionné est cohérent, ceci indépendamment de toute implantation matérielle. Un format textuel de description de graphes suivant ce modèle a été défini en collaboration avec le projet EP-ATR de l'Inria Rennes qui développe le compilateur du langage Signal. Dans le futur, on utilisera le format GC (Graph Code) des langages synchrones, défini dans le cadre du projet Synchrone (CP2I et groupement de recherche C2A) et du projet Eureka Synchron.

**Architecture.** Son modèle permet de spécifier toute architecture hétérogène en termes de composition hiérarchique de composants. Nous distinguons deux types de composants élémentaires : les automates *opérateurs* qui combinent et/ou transforment des données pour produire un résultat et les automates *arbitres* qui gèrent l'accès aux ressources partagées par des opérateurs. Ces ressources sont les médias de communication inter-opérateurs et les séquenceurs de certains opérateurs. Ce modèle est de type RTL (Register Transfer Level) en considérant à un niveau macroscopique les transitions des automates. Chaque *macro-transition*, correspondant à une opération de l'algorithme, encapsule les détails des transitions internes (dues au jeu d'instructions, au micro-programme, au pipe-line et à la mémoire cache), c'est pour cela que

nous l'appelons *Macro-RTL*. Ce modèle est formalisé par un hypergraphe étiqueté dont les sommets sont les opérateurs et les arcs les arbitres. L'étiquetage caractérise chaque sommet en termes des optimisations que l'on envisage, c'est-à-dire actuellement les performances temps réel.

**Implantation.** Elle est formalisée par la composition de quatre transformations de graphes : un routage (connexion complète du graphe de l'architecture), une distribution des opérations de l'algorithme (allocation spatiale sur des opérateurs), une distribution des opérations de transfert de données induites par la transformation précédente, et enfin un ordonnancement des opérations affectées à chaque opérateur (allocation temporelle).

**Noyau d'exécutif générique.** À partir de cette distribution et de cet ordonnancement, un exécutif distribué temps réel, permettant l'exécution de l'algorithme sur l'architecture, peut être généré automatiquement par assemblage des opérations de l'algorithme et des opérations de transfert de données. Afin de minimiser les surcoûts de l'exécutif, toutes les optimisations et les décisions réalisables avant l'exécution donnent lieu à des distributions et des ordonnancements statiques, les autres introduisent un surcoût inévitable de distributions et d'ordonnements dynamiques.

### 3.5.3 Optimisations

Une implantation doit respecter non seulement l'ordre des événements vérifié lors de la spécification de l'algorithme hors contraintes matérielles, mais aussi les contraintes décrites dans la problématique. Actuellement, nous avons restreint cette adéquation à un problème d'optimisation des performances temps réel en termes de latence d'une part et du nombre de composants matériels d'autre part. L'optimisation de la latence étant un problème NP-complet, nous avons développé une heuristique qui est un algorithme glouton visant à minimiser l'allongement de la latence (chemin critique) en prenant en compte les durées des opérations, y compris celles de transfert de données.

### 3.5.4 Prototype SynDEx

Le prototype SynDEx offre dans sa version 3.4 les services suivants :

- Interface avec l'environnement logiciel SIGNAL (version H2.6/Inria Rennes) ou saisie à la souris du graphe flot de données conditionné d'un

algorithme d'application

- Saisie à la souris du graphe d'un multi-composant
- Distribution et ordonnancement optimisant le temps de réponse
- Visualisation d'un diagramme prévisionnel d'exécution temps réel
- Génération de l'exécutif SynDEx en langage C pour fonctionnement en temps réel
- Noyau générique d'exécutif testé sur multi-Transputer et multi-TMS-320C40

## 4 Actions industrielles

### 4.1 Modélisation, identification, commande d'un moteur à combustion interne

*Participants* : F. Aimard, S. Li, L. Royer, M. Sorine

Ce travail est fait avec la Direction de la Recherche de Renault. 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.

L'élément essentiel de dépollution des moteurs à essence étant le pot catalytique, nous centrons nos efforts sur la modélisation et la commande de cet organe. Nous avons obtenu des modèles de finesse et complexité variables (à base d'équations aux dérivées partielles ou d'équations différentielles ordinaires) bien adaptés aux études en simulation de lois de commande et de surveillance. Pour les problèmes de surveillance nous coopérons avec le projet AS de l'Inria Rennes (M. Basseville, C. Cusset). Un simulateur de moteur dépollué fait la synthèse de ces travaux et servira de base aux études à venir. Les principaux résultats obtenus sont les suivants :

- *modélisation* : un modèle du pot a été obtenu à partir des lois décrivant les phénomènes physico-chimiques expliquant les concentrations en oxygène, monoxyde de carbone, oxydes d'azote et hydrocarbures imbrûlés. Il est constitué d'un ensemble d'équations différentielles et aux dérivées partielles permettant de calculer à chaque instant le profil en espace (suivant la longueur du pot) des concentrations de polluants.

Dans le cas d'un pot amorcé (température stabilisée), un premier modèle réduit, constitué uniquement d'équations différentielles et

de retards, a été obtenu. Il exploite la propriété physique suivante, mise en évidence numériquement et théoriquement : l'activité chimique peut se représenter comme ayant lieu dans une couche limite spatiale, située au début du pot. C'est ce modèle qui est utilisé dans le simulateur. Il permet de calculer directement les polluants en sortie du pot. Un modèle simplifié du moteur, proposé et validé pour Renault par J. Abida et D. Claude (LSS) est aussi utilisé pour calculer les polluants en sortie moteur et prévoir l'influence des stratégies de régulation de richesse.

- *commande* : seule la commande en boucle ouverte du pot catalytique a été considérée. On a en particulier étudié la sensibilité de l'efficacité du pot et la robustesse de cette efficacité par rapport au point de fonctionnement du régulateur de richesse (influence des caractéristiques du cycle limite de richesse dû au caractère tout-ou-rien des sondes de richesse dites sondes lambda). Par ailleurs une commande classique de richesse et d'avance à l'allumage a été reproduite dans le simulateur.
- *surveillance* : un premier pas dans cette direction a été fait en incorporant au simulateur des modèles de vieillissement de pot et de sondes de richesse.

## 4.2 Modélisation du contact pneumatique/sol et applications

*Participants* : P.A. Bliman, T. Bonald, A. Dohni, M. Sorine

Ce travail est fait avec la Direction de la Recherche de Renault. Il s'agit d'une application de l'étude des modèles d'hystérésis et en particulier des modèles de frottements secs. Son objectif est de fournir des modèles de contact roue-sol ayant les propriétés suivantes :

- ils sont capables de rendre compte des courbes d'adhérence obtenues expérimentalement,
- ils sont suffisamment simples pour pouvoir être utilisés en temps réel sur ordinateur embarqué dans des applications d'Automatique.

Ces modèles ont potentiellement plusieurs utilisations possibles :

- système anti-blocage, anti-patinage,

- estimateur d'adhérence pour prévenir le conducteur d'un danger lié à une perte d'adhérence,
- simulation du comportement routier d'un véhicule.

Nous avons déjà vérifié par des simulations numériques la consistance de nos modèles avec ceux proposés dans la littérature (modèles de Pacejka et Gim & Nikravesh essentiellement) dans les domaines où les comparaisons sont possibles : pseudo-glissement stabilisé et vitesse du véhicule suffisamment élevée. Cette année, nous avons commencé à évaluer ces modèles dans le domaine des transitoires et faibles vitesses. Deux directions ont été suivies :

- Comparaison à des mesures. Un travail dans ce sens a débuté chez Renault : un premier protocole d'essai a été défini et les premières mesures faites (comportement en latéral dans le cas de trajectoires circulaires). On cherche à définir les fonctionnalités d'un véhicule d'essai.
- Premières applications. Nous avons résolu deux "exercices" inabordable avec les modèles classiques : la simulation d'un démarrage et la simulation d'un comportement d'ABS jusqu'à l'arrêt complet. Dans ces deux cas la vitesse du véhicule passe par zéro et la définition classique du pseudo-glissement est inutilisable. En pratique les simulateurs de comportement routier ne considèrent pas les vitesses en dessous d'un seuil. La propriété d'hystérésis de nos modèles ("rate independence") permet de couvrir sans problème numérique particulier une plage de vitesses partant de zéro.

### 4.3 Projet EUREKA SYNCHRON

*Participants* : C. Lavarenne, Y. 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 Synchron, de l'optimisation d'exécutifs temps réel distribués et du "co-design" (compromis câblé/programmé).

## 5 Actions nationales et internationales

### 5.1 Programmes bilatéraux de collaboration scientifique

- Programme Franco-Allemand Procope : Un premier programme de collaboration avec l'Université Friedrich-Schiller (Iéna) : "Analyse automatique de signaux électrophysiologiques ; application à l'étude de la physiologie et de la physiopathologie du système nerveux du nouveau-né" s'est achevé en 1994, après avoir donné lieu à plusieurs articles et communications à des congrès. La collaboration se poursuit, et un autre projet : "Estimation quantitative de paramètres déterministes de type chaotique sur des séries temporelles physiologiques ; application à l'étude du système nerveux autonome par l'analyse de données de respiration et de rythme cardiaque" a été soumis pour 1995-96.
- Programme Franco-Chilien Ecos (10/1993-10/1996) : "Etude en temps réel des interactions entre les rythmes cardiaque et respiratoire et de leur régulation par le système nerveux autonome" avec l'Inria, l'Université du Chili l'Inserm CFJ8909, l'Hôpital Antoine Bécère, Clamart. La collaboration s'est intensifiée avec la venue à l'Inria d'Alfonso Ehijo, de l'Université du Chili, en juillet-août, pour un séjour d'étude des méthodes de traitement du signal biomédical avec Lary\_C. Une démonstration de Lary\_C et un exposé des premiers résultats cliniques sont prévus en décembre 1994 à Santiago du Chili.

### 5.2 GDR TDSI

Yves Sorel est responsable du groupe de travail GT6, Architectures en traitement du signal du GDR 134 Traitement du Signal et Images.

## 6 Diffusion des résultats

### 6.1 Diffusion de produits

Trente mises à disposition de SynDEX ont été effectuées les années précédentes. Cette année des mises à disposition ont été effectuées pour : l'Esiee Marne la Vallée, l'Ensea-Etis Cergy, le Lasmea Clermont Ferrand, l'ICPI Lyon, le Laim Marseille, le LTI Troyes, L'ENST Bretagne, le Cnet

Lannion, Electronique Associés (Consortium de PME/PMI de la région Bourgogne, dans le domaine de l'électronique), AITA (PME produisant des modules TIM40).

Un news-group "SynDEx" a été créé afin d'améliorer la circulation d'informations entre les utilisateurs et les concepteurs.

## 6.2 Actions d'enseignement

### 6.2.1 Enseignements universitaires

P.-A. Bliman : chargé de TD du cours de "Systèmes linéaires" (Ensta) et du cours "Commande linéaire des systèmes dynamiques" (ENSMP).

J. Henry : Cours de "Calcul scientifique" et de "Commande des systèmes à paramètres distribués" à l'Ecole des Mines de Paris (2ème année).

Y. Sorel : Cours "Algorithmes et Architectures pour le Traitement du Signal en Temps Réel", Ecole d'ingénieurs Esiee Marne la Vallée.

Y. Sorel : Cours "Spécification et Implantation des Systèmes Temps Réel", Ecole d'ingénieurs Ensta, Paris.

M. Sorine : Leçons sur les applications de l'Automatique, DEA Automatique et traitement du signal, Université de Paris 11 (Orsay).

### 6.2.2 Séminaires et formation permanente

P.-A. Bliman : State space representation of hysteresis operators. Application to dry friction modelling and compensation. Séminaire du Dipartimento di Sistemi e Informatica, Università di Firenze, Florence (Italie), Juin 1994.

P.-A. Bliman : Hysteresis modelling. Application to dry friction. Séminaire de l'Institut de Mathématiques de l'Académie des Sciences de la République Tchèque, Prague, Mars 1994.

Dans le cadre de la collaboration avec l'unité Inserm 127, Hôpital Lariboisière, Paris, une application de Lary\_C, ciblée pour l'étude du rythme cardiaque de souris transgéniques, a été mise à disposition des chercheurs Inserm ; leur formation et le traitement des données se sont effectués à l'Inria.

- Vermeiren, C., Médigue, C., Clairambault, J., Curzi-Dascalova, L. (1994): Méthodes temps-fréquence et démodulation complexe. Application à l'étude de la relation rythme cardiaque-fréquence respiratoire. Communication orale au séminaire *Les adaptations du contrôle cardio-respiratoire*, laboratoire des explorations fonctionnelles de l'hôpital A.-Béclère (Pr. P. Escourrou), février 1994.
- Clairambault, J., Médigue, C., Vermeiren, C. (1994): (1) Análisis del ritmo cardíaco : problemas y métodos, (2) Demodulación cardiorrespiratoria latido a latido. Conférences à la Faculté d'Ingénierie de l'Université de BuenosAires (Argentine), et à celle de l'Université du Chili (Santiago), avril 1994.
- Médigue, C. (1994): Utilisation du langage synchrone Signal pour le traitement des signaux physiologiques. Communication orale au séminaire *Les adaptations du contrôle cardio-respiratoire*, laboratoire des explorations fonctionnelles de l'Hôpital A.-Béclère (Pr. P. Escourrou), juin 1994.
- Clairambault, J. (1994): L'activité électrique du cœur vue comme un système dynamique. Que peut en attendre l'observateur du système nerveux autonome ? Communication orale au séminaire *Les adaptations du contrôle cardio-respiratoire*, laboratoire des explorations fonctionnelles de l'Hôpital A.-Béclère (Pr. P. Escourrou), juin 1994.
- C. Lavarenne et Y. Sorel : Session de formation au logiciel SynDEx pour le GDR Traitement du signal et images.
- C. Lavarenne et Y. Sorel : Session de formation au logiciel SynDEx pour un consortium de PME/PMI de Bourgogne.
- Y. Sorel : Séminaire A<sup>3</sup> "Adéquation Algorithme Architecture pour le Signal et l'Image", en collaboration avec le GDR134 TDSI.

### 6.3 Participation à des manifestations

- Présentation de Lary\_C et SynDEx à l'exposition Francia 2000, à Buenos Aires (Argentine), du 28 novembre au 1<sup>er</sup> décembre 1994.
- Présentation de SynDEx au CeBIT à Hanovre (Allemagne), Mars 1994.

## 7 Publications

### Articles et chapitres de livre

- [1] P.-A. BLIMAN, A.-M. KRASNOSEL'SKII, M. SORINE, A.-A. VLADIMIROV, «Nonlinear Resonance in Systems with Hysteresis», *Nonlinear Analysis*, accepté.
- [2] P.-A. BLIMAN, A.-M. KRASNOSEL'SKII, M. SORINE, A.-A. VLADIMIROV, «Forced Oscillations in Control Systems with Hysteresis», *C.R. de l'Académie des Sciences russe (Russian Math. Doklady)*, soumis.
- [3] J. HENRY, B. LOURO, «Asymptotic analysis of reaction - diffusion - electromigration systems», *Asymptotic Analysis*, accepté.
- [4] A.-M. KRASNOSEL'SKII, M. SORINE, «Discrete Asynchronous Iterations», *Automation and Remote Control*, accepté.
- [5] L. SPASSOV, L. CURZI-DASCALOVA, J. CLAIRAMBAULT, F. KAUFFMANN, C. MÉDIGUE, P. PEIRANO, «Heart rate and heart rate variability in small-for-gestational-age newborns», *Pediatric Research*, 35, 1994, p. 500-505.

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

- [6] A. BENVENISTE, T. GAUTHIER, P. LE GUERNIC, G. BERRY, F. MIGNARD, P. CASPI, N. HALBWACHS, P. COURONNE, F. DUPONT, C. LE MAIRE, J.-P. PARIS, Y. SOREL, «Synchronous Technology for Real-Time Systems», *in: Real-Time Systems*, Paris, 1994.
- [7] J.-I. DIAZ, J. HENRY, A.-M. RAMOS, «On the cancellation method for the approximate controllability of some nonlinear diffusion processes», *in: Proceedings, Conférence : Modelado de sistemas en oceanografia climatologia y ciencias medio-ambientales : aspectos matematicos numericos*, p. 211-216, Malaga, Juin 1994.
- [8] J. HENRY, J.-P. YVON, «On some weighting methods to improve O.L.S. identification problems», *in: Proceedings, Ifip-WG 7.8 Conference on Control of Partial Differential Equations and Applications*, Ifip, Laredo, septembre 1994.
- [9] C. LAVARENNE, C. MILAN, M. PAINDAVOINE, Y. SOREL, «Implantation d'un algorithme de segmentation d'image sur une architecture multi-processeur avec l'environnement d'aide à l'implantation SynDEX», *in: Workshop Adéquation Algorithmes Architectures pour Traitement du Signal et des Images*, Grenoble, Janvier 1994.

- [10] C. LAVARENNE, Y. SOREL, «Optimisation et génération d'exécutifs distribués temps-réel pour algorithmes spécifiés avec les langages Synchrones», *in: Real-Time Systems*, Paris, 1994.
- [11] C. MÉDIGUE, J. CLAIRAMBAULT, C. VERMEIREN, P. PEIRANO, L. CURZI-DASCALOVA, «Heart rate response to body movements according to sleep states in normal human neonates», *in: Journal of Sleep Research, Poster au XII<sup>e</sup> congrès de l'European Sleep Research Society*, 3, suppl. 1, European Sleep Research Society, p. 163, Florence, mai 1994.
- [12] Y. SOREL, «Massively Parallel Systems with Real Time Constraints. The "Algorithm Architecture Adequation" Methodology», *in: Massively Parallel Computing Systems, the Challenges of General-Purpose and Special-Purpose Computing*, Ischia Italy, Mai 1994.
- [13] C. VERMEIREN, C. MÉDIGUE, J. CLAIRAMBAULT, L. CURZI-DASCALOVA, «Beat-to-beat cardio-respiratory demodulation», *in: Proceedings, Ifac Symposium on modelling and control in biomedical systems*, Ifac, p. 142-143, Galveston, TX, Mars 1994.
- [14] J. YVON, G. JOLY, S. MOTTET, «Application of  $H_\infty$  control to wave generators in a canal», *in: Siam Symposium on Control Problems in Industry*, San Diego, 22-23 July 1994.

## Rapports de recherche et publications internes

- [15] M. BASSEVILLE, C. CUSSENOT, L. ROYER, S. LI, M. SORINE, «Modélisation d'un moteur thermique dépollué pour l'étude de systèmes de surveillance/diagnostic - avenant au Contrat Renault Inria/29», *Rapport de fin de contrat*, Inria, 1994.
- [16] J. BESTEL, *Etude de méthodes temps-fréquence appliquées au Rythme Cardiaque développées en langage synchrone Signal*, Mémoire, stage seconde année, ICPI-CPE Lyon, section électronique et traitement de l'information, Septembre 1994.
- [17] C. BONNET, J.-R. PARTINGTON, «Robust stabilization in the Bibo gap topology», *Preprint series n° 7*, Department of Pure Mathematics, University of Leeds, 1994.
- [18] P. BOURNAI, C. LAVARENNE, P. LE GUERNIC, O. MAFFEÏS, Y. SOREL, «Interface Signal-SynDEX», *Rapport de recherche n° 2206*, Inria, Mars 1994.
- [19] N. CHARLOTTE, *Etude de la variabilité de la fréquence cardiaque chez la souris consciente par méthode d'analyse spectrale et non spectrale. Influence des  $\beta$ -bloquants*, Mémoire, DEA "biologie, physiologie et physiopathologie des appareils circulatoire et respiratoire", Unité Inserm 127 (biologie et physiopathologie du système cardiovasculaire) et Laboratoire

de Physiologie Médicale de la Faculté de Médecine de Rennes, Septembre 1994.

- [20] A. DOHNI, T. BONALD, *Modélisation de frottement sec et application à des systèmes d'aide à la conduite automobile*, Mémoire, Ecole Polytechnique, Juillet 1994.
- [21] A. KROUMA, *Méthodes d'analyse de la variabilité des signaux cardiovasculaires implémentées en langage synchrone Signal*, Mémoire, DEA Génie Biologique et Médical, Université Paris 12, Septembre 1994.
- [22] S. LI, M. SORINE, «Modèles de pots catalytiques - Contrat Renault Inria/29», *Rapport de fin de contrat*, Inria, 1994.
- [23] L. ROYER, *Modélisation et surveillance d'un moteur thermique dépollué*, Mémoire, DEA Automatique industrielle, Ecole Centrale de Lyon, Septembre 1994.
- [24] Y. SOREL, «Génération d'exécutifs distribués optimisés pour les langages Synchrones - Contribution Inria-Rocquencourt au rapport final du Contrat C2A A/S», *Rapport de fin de contrat*, Inria, 1994.
- [25] C. VERMEIREN, C. MÉDIGUE, A. KROUMA, J. BESTEL, «LARY\_C : logiciel d'Analyse des Rythmes Physiologiques pour l'étude du Système Nerveux Autonome», *Rapport technique n°0166*, Inria, Septembre 1994.

### Œuvres audiovisuelles

- [26] J. CLAIRAMBAULT, C. MÉDIGUE, L. CURZI-DASCALOVA, *Un rythme contrôlé*, S. Dewez (prod.), 6 min., Magazine Archimède, Arte, 2 Mai 1994 à 19h30.

## 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.

## Table des matières

<b>1</b>	<b>Composition de l'équipe</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Présentation du projet</b>	<b>2</b>
<b>3</b>	<b>Actions de recherche</b>	<b>4</b>
3.1	Modèles d'hystérésis et applications . . . . .	4
3.1.1	Modélisation et compensation de frottements secs	4
3.1.2	Comportement qualitatif des systèmes à hystérésis	6
3.2	Commande de systèmes à retards . . . . .	6
3.3	Etude de l'introduction de poids dans le critère d'erreur de problèmes d'identification . . . . .	7
3.4	Applications du traitement du signal au génie biomédical	8
3.4.1	Etude de la régulation du rythme cardiaque par le système nerveux autonome . . . . .	8
3.4.2	Lary-C : Logiciel d'Analyse du Rythme Cardiaque et de ses relations avec d'autres rythmes physiologiques . . . . .	11
3.4.3	Modélisation et étude de phénomènes d'interaction en électrophysiologie cardiaque . . . . .	11
3.5	Méthode d'Adéquation Algorithme Architecture pour la commande et le traitement du signal en temps réel . . . .	12
3.5.1	Problématique . . . . .	12
3.5.2	Modèles . . . . .	13
3.5.3	Optimisations . . . . .	14
3.5.4	Prototype SynDEx . . . . .	14
<b>4</b>	<b>Actions industrielles</b>	<b>15</b>
4.1	Modélisation, identification, commande d'un moteur à combustion interne . . . . .	15
4.2	Modélisation du contact pneumatique/sol et applications .	16
4.3	Projet EUREKA SYNCHRON . . . . .	17

<b>5</b>	<b>Actions nationales et internationales</b>	<b>17</b>
5.1	Programmes bilatéraux de collaboration scientifique . . . .	17
5.2	GDR TDSI . . . . .	18
<b>6</b>	<b>Diffusion des résultats</b>	<b>18</b>
6.1	Diffusion de produits . . . . .	18
6.2	Actions d'enseignement . . . . .	19
6.2.1	Enseignements universitaires . . . . .	19
6.2.2	Séminaires et formation permanente . . . . .	19
6.3	Participation à des manifestations . . . . .	20
<b>7</b>	<b>Publications</b>	<b>20</b>
<b>8</b>	<b>Abstract</b>	<b>23</b>