

# *Projet SOSSO*

*Applications et Outils de l'Automatique*

*Rocquencourt*

THÈME 4A



*R*apport  
*d'Activité*

2001



## Table des matières

<b>1</b>	<b>Composition de l'équipe</b>	<b>4</b>
<b>2</b>	<b>Présentation et objectifs généraux</b>	<b>5</b>
2.1	Thèmes de recherche du projet . . . . .	5
<b>3</b>	<b>Fondements scientifiques</b>	<b>7</b>
3.1	Modélisation des systèmes à hystérésis . . . . .	7
3.1.1	Une classe de modèles d'hystérésis « rate independent » . . . . .	7
3.1.2	Quelques applications des modèles d'hystérésis . . . . .	10
3.2	Analyse et commande de systèmes à hystérésis ou à retards . . . . .	11
3.2.1	Comportement qualitatif de systèmes non linéaires. Problèmes de stabilité et d'oscillations . . . . .	11
3.2.2	Commande robuste de systèmes à retards . . . . .	13
3.3	Modélisation et commande de systèmes physiologiques. . . . .	17
3.3.1	Modélisation mécanique du myocarde. . . . .	17
3.3.2	Analyse et modélisation du système cardio-respiratoire et de ses mécanismes de régulation . . . . .	19
3.3.3	Modélisation d'activités rythmiques d'origine centrale. . . . .	19
3.3.4	La fonction de reproduction vue sous l'angle de la commande . . . . .	20
3.3.5	Modélisation et commande pharmacologique de systèmes physiologiques altérés. . . . .	21
3.4	Méthode d'« Adéquation Algorithme Architecture » . . . . .	22
3.4.1	Contexte et objectifs . . . . .	22
3.4.2	Modèle d'algorithme . . . . .	23
3.4.3	Modèle d'architecture . . . . .	25
3.4.4	Modèle d'implantation . . . . .	26
3.4.5	Implantation optimisée : adéquation . . . . .	27
3.4.6	Génération d'exécutifs et de « net-lists » . . . . .	29
3.4.7	Tolérance aux pannes . . . . .	30
<b>4</b>	<b>Domaines d'applications</b>	<b>30</b>
4.1	Panorama . . . . .	30
4.2	Automatique, Informatique et Automobile . . . . .	31
4.2.1	Les thèmes de l'accord Inria-Renault en électronique embarquée dans l'automobile . . . . .	31
4.2.2	Les sujets de recherche . . . . .	32
4.3	Automatique, Traitement du signal et Sciences biomédicales . . . . .	32
4.3.1	Analyse et modélisation du système cardio-respiratoire et de ses mécanismes de régulation . . . . .	33
4.3.2	La fonction de reproduction vue sous l'angle de la commande . . . . .	35
4.3.3	Commande chronopharmacologique en clinique : applications en bactériologie et en cancérologie . . . . .	36

4.4	Systèmes embarqués pour la commande et le traitement du signal et des images	36
<b>5</b>	<b>Logiciels</b>	<b>37</b>
5.1	LARY_CR, logiciel d'analyse des rythmes cardio-respiratoires . . . . .	37
5.2	SynDEx, logiciel d'aide à l'implantation d'applications temps réel embarquées .	37
<b>6</b>	<b>Résultats nouveaux</b>	<b>38</b>
6.1	Propriétés indépendantes du retard des systèmes à retard et étude des systèmes à paramètres incertains . . . . .	38
6.2	Modélisation et commande des systèmes à retards ou à hystérésis . . . . .	39
6.2.1	Commande de systèmes à retard avec sortie tout-ou-rien . . . . .	39
6.2.2	Stabilisation robuste des systèmes exponentiels fractionnaires et/ou à retards . . . . .	40
6.3	Automatique, Traitement du signal et Sciences biomédicales. . . . .	41
6.3.1	Modélisation en électrophysiologie cardiaque . . . . .	42
6.3.2	Modélisation mécanique du myocarde. . . . .	42
6.3.3	Analyse descriptive du scv et de son contrôle par le SNA . . . . .	43
6.3.4	Modélisation du centre de commande respiratoire . . . . .	46
6.3.5	Analyse de VCG à l'aide de l'algorithme de « Matching Pursuit » . . . .	47
6.3.6	Modélisation et commande de la fonction ovarienne . . . . .	47
6.3.7	Commande chronopharmacologique en clinique : applications en bactériologie et en cancérologie . . . . .	48
6.4	Méthode d'« Adéquation Algorithme Architecture » . . . . .	48
<b>7</b>	<b>Contrats industriels (nationaux, européens et internationaux)</b>	<b>53</b>
7.1	Modélisation de la pollution et de la consommation de moteurs essence . . . . .	53
7.2	Exemples de problèmes d'automatique des systèmes hybrides : modélisation, optimisation et commande de divers groupes motopropulseurs . . . . .	54
7.3	Application des modèles de frottements secs à la caractérisation de suspensions à lames pour poids-lourds . . . . .	54
7.4	Modélisation réduite pour la commande d'une Pile à Combustible . . . . .	55
7.5	CyCab du projet IMARA . . . . .	56
7.6	Collaboration Robosoft . . . . .	56
7.7	Thomson-CSF-Télécommunications, Thomson-CSF-LCR, Simulog . . . . .	56
7.8	Contrat Synopsis-Castor . . . . .	56
7.9	Collaboration EADS . . . . .	57
<b>8</b>	<b>Actions régionales, nationales et internationales</b>	<b>57</b>
8.1	Actions nationales . . . . .	57
8.1.1	ACI SCARAMOCO (Système CARdio-Respiratoire : une Approche MOdélisation et COmmande) . . . . .	57
8.1.2	Actions de recherche coopératives Inria . . . . .	57
8.1.3	Programme de recherche interdisciplinaire « Modélisation et commande des régulations biologiques » . . . . .	58

---

8.1.4	Projet National RNRT . . . . .	58
8.1.5	Projet National RNTL . . . . .	58
8.1.6	Projet national AEE . . . . .	59
8.1.7	Action de développement AEE . . . . .	59
8.2	Actions européennes . . . . .	59
8.2.1	Projet Européen SAFE . . . . .	59
8.3	Actions internationales . . . . .	59
8.3.1	Projet de l'institut Lyapunov . . . . .	59
8.3.2	Convention NSF . . . . .	60
8.3.3	TMR Nonlinear Control Network, Control Training Site . . . . .	60
8.4	Visites, et invitations de chercheurs . . . . .	60
8.4.1	Visites, invitations de chercheurs du projet . . . . .	60
8.4.2	Visites de chercheurs étrangers . . . . .	60
<b>9</b>	<b>Diffusion de résultats</b>	<b>60</b>
9.1	Animation de la communauté scientifique . . . . .	60
9.2	Enseignement universitaire . . . . .	61
<b>10</b>	<b>Bibliographie</b>	<b>62</b>

## 1 Composition de l'équipe

### Responsable scientifique

Michel Sorine [DR Inria]

### Responsable permanent

Yves Sorel [DR Inria]

### Assistante de projet

Martine Verneuille [SAR Inria]

### Personnel Inria

Pierre-Alexandre Bliman [CR]

Catherine Bonnet [CR]

Jean Clairambault [PRAG à l'Université Paris VIII, St Denis, détaché à l'Inria depuis octobre 2001]

Frédérique Clément [CR]

Claire Médigue [IR]

### Ingénieur associé INRIA

Christophe Macabiau

### Collaborateurs extérieurs

Jean Clairambault [PRAG à l'Université Paris VIII, St Denis jusqu'en octobre 2001]

Daniel Claude [Professeur, Université d'Orsay]

Thierry Grandpierre [professeur assistant ESIEE depuis le 1/09/2001]

Rémy Kocik [professeur assistant ESIEE]

Mayer Landau [CR CNRS, UPRES-A 8071]

Laurence Mangin [Chef de clinique, Service de pharmacologie clinique, Hôpital Henri Mondor et Unité Inserm 127, Hôpital Lariboisière]

Jean-Pierre Yvon [professeur, INSA de Rennes]

### Chercheurs invités

Emilia Fridman [University Tel-Aviv, Israël (1 semaine)]

Leonid Mirkin [Technion, Haïfa, Israël (2 semaines)]

Jonathan Partington [Université de Leeds (1 semaine)]

Panagiotis Tsiotras [Georgia Institute of Technology, Atlanta (2 semaines)]

Alexander Zhdanov [Institute for System Programming, RAS, Moscou, Russie (1 semaine)]

### Chercheurs post-doctorants

Thierry Grandpierre [AD AEE jusqu'au 1/09/2001]

José Urquiza [co-encadrement MACS, ARC ICEMA jusqu'en juillet 2001]

Antoine Viel [depuis octobre 2000]

### Doctorants

Karim Bencherif [Cifre Renault, Université de Paris-Dauphine]

Arnaud Clavel [Cifre Renault, co-encadrement Sigma2]

Liliana Cucu [boursière INRIA ]

Rachid Djenidi [Éducation Nationale, co-encadrement Metalau, Université de Créteil jusqu'au 2/07/2001]

Pascal Emery [Cifre Renault, co-encadrement Laboratoire de thermique, Paris VI]

Linda Kaouane [co-encadrement ESIEE]  
Nathalie Méaupe-Venot [Cifre Renault, Université de Paris-Dauphine]  
Alessandro Monti [bourse MENRT, Université d'Orsay]

### Stagiaires

Youssef Fakhreddine [ENSTA]  
Méziane Kamel [DESS Université Paris 12]

## 2 Présentation et objectifs généraux

**Mots clés** : systèmes à hystérésis, systèmes à retards, systèmes avec saturation, systèmes linéaires fractionnaires, oscillations non linéaires, commande robuste, critères de stabilité, ingénierie, environnement, modélisation, commande, moteurs thermiques, éléments de systèmes de dépollution, frottements, santé, système cardio-respiratoire, mécanique du myocarde, contraction musculaire, système nerveux autonome (SNA), inhibition-stimulation du SNA, système pacemaker, onde de Mayer, contrôle, commande, optimisation, ordonnancement, transports, prototypage rapide, systèmes de contrôle-commande, traitement du signal, co-design, CAO système, langage synchrone, multiprocesseur, parallèle, distribué, réparti, temps réel, embarqué, exécutif.

### 2.1 Thèmes de recherche du projet

L'objectif de ce projet est 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 modélisation, de commande, d'informatique temps réel.

Les domaines d'application privilégiés sont l'AUTOMOBILE, la SANTÉ et les SYSTÈMES EMBARQUÉS pour l'Automatique et le Signal.

**Nos applications à l'AUTOMOBILE** sont facilitées par l'accord-cadre Inria-Renault en « Électronique embarquée » qui fournit des sujets s'inscrivant dans une démarche à long terme visant des véhicules peu polluants et sûrs. Cet accord qui a bien fonctionné pendant la période 96–99, est en cours de renouvellement pour quatre ans. On y trouve aussi bien des problèmes de modélisation et commande de « simples » composants, souvent des objets inventés pour la réalisation de véhicules propres (nouveaux pots catalytiques, nouveaux capteurs de gaz, nouvelles batteries . . .) ou des objets réinventés en permanence comme les moteurs thermiques qui fournissent d'ailleurs un véritable défi à l'Automaticien : avec l'injection directe (essence ou diesel) et les soupapes pilotées, nous avons beaucoup des éléments nécessaires pour commander finement la combustion. Il manque encore des capteurs (pression, température dans la chambre de combustion), des modèles utilisables en commande, et bien sûr des stratégies de commande : pour ne donner qu'un exemple des possibilités offertes par ces nouveaux actionneurs, disons que l'arbre à cames dans ce cas, n'est plus mécanique mais logiciel et qu'il peut être intéressant de ne pas se limiter aux quatre temps classiques, mais d'émuler des cycles variables entre deux et douze temps ! Nous avons commencé à étudier ce problème du point de vue de la modélisation.

**Nos applications à la SANTÉ** sont centrées actuellement sur le système cardio-respiratoire. Ce système, observé sur un horizon de quelques minutes, apparaît comme un système régulé (par le système nerveux autonome (SNA)), assemblage complexe d'éléments faisant intervenir des phénomènes mécaniques et électro-chimiques. Ici, l'approche automatique, basée sur des modèles, devrait permettre d'accéder à des indicateurs globaux de l'état du système, calculables à l'aide de méthodes de traitement du signal et d'identification. Le « gain de l'arc baroréflexe à la fréquence de l'onde de Mayer » que nous étudions, en est un exemple. Ce domaine présente de nombreux défis où l'approche automatique peut aider, comme dans le cas de la compréhension des mécanismes de certaines syncopes ou l'étude de principes d'asservissement de stimulateurs cardiaques.

Cette démarche automatique se retrouve dans les autres études faites dans le cadre du programme de recherche interdisciplinaire « Modélisation et commande de régulations biologiques » que coordonne Daniel Claude.

**Notre activité concernant les SYSTÈMES EMBARQUÉS pour l'Automatique et le Signal** est centrée sur l'automobile. Elle est née au début des années 90 pour se préparer à l'évolution qu'allait entraîner l'introduction dans la voiture d'un réseau reliant calculateurs, capteurs, actionneurs ... Elle bénéficiait alors d'une longue tradition de coopération des automaticiens Inria avec les informaticiens Inria du « temps réel synchrone ». L'informatique embarquée continue à évoluer, dans l'automobile et ailleurs (électronique nomade ...), et notre activité dans ce domaine s'étend maintenant au delà du cadre du projet : elle s'inscrit depuis 1999 dans une action de développement Inria, AEE (Architectures Électroniques Embarquées) dont Yves Sorel est responsable et dans une action nationale de même nom qui rassemble constructeurs et équipementiers automobiles français.

Dans le projet, nos participations passées à l'action Praxitele, puis maintenant à LaRA, avec la conception des véhicules Cycab, sont des occasions de tester en vraie grandeur notre démarche en commande et mise en œuvre temps réel des méthodes de l'Automatique.

Les sujets précis étudiés dans le projet sont choisis en fonction de compétences que nous voulons développer, choisies pour leur intérêt propre et pour leur utilité dans nos applications :

#### **La modélisation mathématique, l'identification et la commande :**

- De *systèmes à hystérésis* avec, actuellement, des applications aux problèmes de frottements ; aux problèmes de commande moteur ; en électrophysiologie cardiaque (étude du myocarde).
- De *systèmes de réaction - diffusion* avec application à la modélisation de phénomènes physico-chimiques rencontrés dans nos applications « Santé » : conduction dans les nerfs sympathique ou parasympathique, dynamique du Calcium dans les cellules cardiaques - ou dans nos applications « Automobile » : dynamique des pots catalytiques et sondes de richesse pour moteurs à combustion interne, modèles réduits pour ces moteurs.
- De *systèmes à retards* qui interviennent en automobile (régulation de richesse des gaz, commande d'organes à travers un bus multiplexé ...).
- De *systèmes oscillants*, souvent à base d'éléments précédents : hystérésis, retards ... et qui interviennent aussi bien en automobile (« battements de sonde » de richesse, cycles limites de stockage/déstockage des oxydes d'azote dans un « piège » à  $NO_x$  ...) ou liés au



système cardio-respiratoire (Ondes de Mayer et sous-harmoniques du rythme cardiaque, rythme endogène respiratoire ...).

### La conception et la programmation temps réel d'algorithmes de commande et de traitement du signal :

- Spécification de traitements multicadences complexes en utilisant SCILAB et SCICOS développés par le projet METALAU. Application au traitement de signaux physiologiques (ECG, respiratoire, pression artérielle, mouvements ...) avec le développement de LARY\_CR.
- Développement de la méthodologie *Adéquation Algorithme Architecture (AAA)* pour résoudre les problèmes de prototypage rapide optimisé et de conception conjointe logiciel-matériel (« co-design ») posés par l'implantation sous contraintes temps-réel et d'embarquabilité devant être tolérante aux pannes, d'algorithmes de contrôle-commande, de traitement du signal et des images, sur des architectures hétérogènes composées de processeurs et/ou de circuits spécialisés (ASIC, FPGA) interconnectés. Pour supporter cette méthodologie, nous développons le logiciel de CAO niveau système *SynDEX*.

## 3 Fondements scientifiques

### 3.1 Modélisation des systèmes à hystérésis

**Participants :** Pierre-Alexandre Bliman, Michel Sorine.

**Mots clés :** hystérésis, cycle d'hystérésis, solution périodique, hystérésis et frottement, comportement élasto-plastique, hystérésis en chimie, hystérésis et modélisation de muscles, santé, ingénierie, environnement.

**Résumé :** *Les phénomènes d'hystérésis sont difficiles à prendre en compte en Automatique : leur modélisation est délicate et la commande des systèmes à hystérésis est un problème largement ouvert. Nous proposons ici une classe de modèles assez faciles à mettre en œuvre. En fait, après un changement de variable temps, ils deviennent linéaires.*

#### 3.1.1 Une classe de modèles d'hystérésis « rate independent »

La principale motivation des travaux de modélisation, d'analyse et de commande de systèmes à hystérésis que nous menons, vient de 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 au sol d'une automobile. Le point de vue adopté est de modéliser ces frottements par des opérateurs d'hystérésis dissipatifs que nous proposons<sup>[PS96]</sup>. Il a été utilisé pour l'étude du contact pneu/sol.

---

[PS96] 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.

- 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<sup>[ALS96]</sup> et aussi lors de l'étude du couplage cellules cardiaques pacemaker - cellules non pacemaker<sup>[?]</sup>.

- systèmes biomécaniques. Ici les phénomènes d'hystérésis correspondent à un comportement élasto-plastique de fibres musculaires.

Dans le langage courant, l'hystérésis correspond à l'apparition d'un « retard » dans l'évolution d'un phénomène physique par rapport à un autre. C'est donc un phénomène dû à un effet de mémoire. Les équations d'évolution (équations différentielles ordinaires ou aux dérivées partielles) servent classiquement à modéliser ces effets. Usuellement, les événements qui correspondent au passage d'un état à un autre (la dynamique du système) sont datés en temps physique. Parfois, il est plus naturel d'utiliser une autre « horloge » que le temps usuel. Par exemple, pour un véhicule automobile, un compteur de demi-tours moteur est une horloge naturelle pour dater des événements liés aux diverses combustions (une combustion par demi-tour pour un moteur 4 temps-4 cylindres) : c'est un cas particulier où une distance parcourue (angulaire ici) est l'horloge naturelle pour dater des événements. Nous en verrons des exemples.

Les phénomènes à mémoire qui nous intéressent sont ceux ayant un temps propre (distance parcourue, énergie dissipée ...) différent du temps usuel. Ce sont des phénomènes endochrones ou « rate independent ». La définition précise que nous avons adoptée, conforme à la théorie générale de l'hystérésis<sup>[MA89,Vis88]</sup>, est la suivante :

Pour des fonctions définies sur l'intervalle de temps  $[0, T]$ ,  $y = H(u)$  est un opérateur d'hystérésis, s'il est causal et si son graphe est invariant par changement de temps (du type  $s = \varphi(t)$ ) :

$$\begin{cases} H(u \circ \varphi) = H(u) \circ \varphi, & \text{presque partout sur } [0, T] \\ \text{pour tout difféomorphisme croissant } \varphi \text{ sur } [0, T]. \end{cases} \quad (1)$$

Cela signifie, par exemple, que si  $u$  étant une fonction périodique,  $H(u)$  en est une aussi, alors, dans un diagramme  $u \rightarrow H(u)$  on voit apparaître des cycles dont la forme est indépendante de la période de  $u$  (contrairement à ce qui se passerait pour des cycles de Lissajous). Par exemple,  $H(u) = \text{sign}(\dot{u})$  est un opérateur (multivalué) d'hystérésis, modèle du frottement de Coulomb, qui conduit à des cycles d'hystérésis rectangulaires, évidemment indépendants de l'amplitude  $|\dot{u}|$  de la vitesse.

Nous avons montré<sup>[PS93]</sup> le résultat de factorisation suivant qui caractérise les opérateurs d'hystérésis et permet d'en construire de nombreux sous la forme, très utile dans les applications, d'une équation d'état et d'une équation de sortie :

- 
- [ALS96] 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.
- [?] \*\*\* ERROR: citation 'Landau1-97' undefined \*\*\*
- [MA89] M.A. KRASNOSEL'SKIĬ, A.V. POKROVSKIĬ, *Systems with hysteresis*, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 1989.
- [Vis88] A. VISINTIN, *Mathematical models of hysteresis*, Topics in nonsmooth analysis, Birkhäuser Verlag, Basel Boston Berlin, 1988.
- [PS93] P.-A. BLIMAN, M. SORINE, « A system theoretic approach of systems with hysteresis: Application to friction modelling and compensation », in: *ECC'93, European Control Conference, ECCA*, p. 1844-1849, Groningen, 28 Juin-1 Juillet 1993.

Si  $H$  est un opérateur *continu* de l'espace de Sobolev  $W^{1,1}([0, T])$  dans  $C^0([0, T])$ , alors :

$$\forall u \in W^{1,1}([0, T]), \quad H(u) = H(\Sigma(u)) \circ S(u),$$

avec

$$S(u)(t) = \int_0^t |\dot{u}(\tau)| d\tau, \quad \Sigma(u) = u \circ S^{-1}(u).$$

Inversement, soit  $H_S$  un opérateur causal, continu de  $W_{loc}^{1,\infty}(0, \infty)$  dans  $C_{loc}^0(0, \infty)$ . Alors, l'opérateur défini par

$$H(u) = H_S(\Sigma(u)) \circ S(u),$$

est un opérateur d'hystérésis continu de  $W^{1,1}([0, T])$  dans  $C^0([0, T])$ .

Nous avons étudié le cas où  $H_S$  est un filtre linéaire : pour  $A, B, C$ , matrices de tailles convenables, on définit  $F_S$  par

$$\begin{cases} \frac{dx_S}{ds} = Ax_S + Bu_S, & x_S(0) = x_0, \\ F_S(u_S) = Cx_S. \end{cases} \quad (2)$$

Dans les applications au frottement,  $s = S(u)(t)$  est une variable d'espace (distance parcourue par le degré de liberté source du frottement) et les frottements qui ont été considérés sont

$$H(u) = F_S \left( \frac{d\Sigma(u)}{ds} \right) \circ S(u) + D \text{sign}(\dot{u}), \quad (3)$$

où  $\frac{d\Sigma(u)}{ds}$  est en général la tangente unitaire à la trajectoire de contact, support du frottement de Coulomb, filtrée ici par  $F_S$ . L'effet Dahl et la stiction (néologisme anglais pour « static friction ») par exemple, sont représentés par des filtres respectivement du premier et du deuxième ordre. La propriété principale de ces modèles est la représentation linéaire suivante :  $y_S$  étant défini par

$$\begin{cases} \frac{dx_S}{ds} = Ax_S + B \frac{d\Sigma(u)}{ds}, & x_S(0) = x_0, \\ y_S = Cx_S + D \frac{d\Sigma(u)}{ds}, \end{cases}$$

on a l'expression suivante de  $H(u)$  :

$$H(u)(t) = (y_S \circ S(u))(t) \text{ sur } [0, T] - \Omega(u),$$

où  $\Omega(u)$  est l'union des segments sur lesquels  $S(u)$  est constant. On peut déduire de là de nombreuses propriétés, en s'inspirant des techniques de l'Automatique des systèmes linéaires<sup>[PS95]</sup>.

---

[PS95] P.-A. BLIMAN, M. SORINE, « Easy-to-use realistic dry friction models for automatic control », in : *Proc. of the 3rd European Control Conference*, Rome, 1995.

Dans les applications rencontrées, un prolongement naturel de  $H(u)$  à  $[0, T]$  se résume ainsi :

$$\left\{ \begin{array}{l} S(u)(t) = \int_0^t |\dot{u}(\tau)| d\tau, \\ \Sigma(u) = u \circ S^{-1}(u), \\ \frac{dx_S}{ds} = Ax_S + B \frac{d\Sigma(u)}{ds}, \quad x_S(0) = x_0, \\ y_S = Cx_S + D \frac{d\Sigma(u)}{ds}, \\ H(u) = y_S \circ S(u) \end{array} \right. \quad (4)$$

### 3.1.2 Quelques applications des modèles d'hystérésis

**Hystérésis et frottements.** Grâce à la linéarité sous-jacente, la dissipativité du frottement est équivalente au caractère positif réel de la réalisation  $(A, B, C, D)$ , ce qui s'écrit sous la forme d'un test algébrique simple. Par exemple, dans le cas monovalué (lorsque  $D = 0$ ), cette condition est :

$$\begin{aligned} \exists P = P^T > 0, \quad Q = Q^T > 0, \\ A^T P + PA = -Q, \quad C^T = PB. \end{aligned}$$

La régularisation des graphes multivoques associés au frottement de Coulomb ou à la stiction, devient un problème de perturbation singulière du système linéaire ...

On peut donner une interprétation thermo-mécanique de nos modèles et, en particulier, des conditions de dissipativité. Les modèles dissipatifs apparaissent comme des modèles de comportements élasto-plastiques que l'on peut définir à partir d'un pseudo-potentiel de dissipation et d'une fonction d'énergie libre, formes quadratiques qui apparaissent dans l'expression du travail<sup>[PS96]</sup> :

$$H(u)\dot{u} = \frac{1}{2}(Qx, x)|\dot{u}| + \frac{1}{2} \frac{d}{dt}(Px, x).$$

Cette construction fournit une paramétrisation de la sous-classe des modèles dissipatifs, la plus importante dans les applications, et une voie pour l'extension au cas vectoriel.

Le modèle le plus fréquemment utilisé est sans doute le modèle dit de Dahl, qui rend compte d'un comportement élastique pendant la transition de Coulomb. C'est un cas particulier de (3) ( $A = k_1 < 0$ ,  $B = k_2 > 0$ ,  $C = 1$ ,  $D = 0$ ) :

$$\dot{f} = k_1 f |\dot{u}| + k_2 \dot{u}, \quad (5)$$

où  $f$  est le frottement et  $u$  le déplacement relatif.

**Hystérésis et cinétique chimique.** Nous avons obtenu des modèles de pots catalytiques de complexité variable correspondant à divers usages : de la simulation fine à la commande/diag-

---

[PS96] 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.

nostic en temps réel<sup>[ALS96]</sup>. Voici un exemple de modèle simple, utile en commande :

$$\begin{cases} \dot{\mathcal{R}} = -\frac{V_g}{L}(\mathcal{R} - \mathcal{R}^{in}) + K(\theta_s - \theta_s(0)), \\ \dot{\theta}_s = \mu(\text{sign}\dot{\mathcal{R}})\left(\frac{1 - \text{sign}\dot{\mathcal{R}}}{2} - \theta_s\right)|\dot{\mathcal{R}}|, \end{cases} \quad (6)$$

où  $\theta_s$  est la saturation en oxygène des sites de cerium (dite « stock d'oxygène ») et où  $\mathcal{R}(t) = \int_0^t R d\tau$ ,  $\mathcal{R}^{in}(t) = \int_0^t (R^{in} - 1)d\tau$  avec  $R^{in}$  richesse des gaz à l'entrée du pot et  $R$  richesse à la sortie. Le mécanisme de stockage d'oxygène est caractérisé ici, par les vitesses de stockage ( $\mu(1)$ ), de déstockage ( $\mu(-1)$ ) et par la capacité dont dépend  $K$ . Le temps de séjour des gaz dans le pot est  $\frac{L}{V_g}$ . La fonctionnelle  $\theta_s = \mathcal{H}(\mathcal{R})$  est un opérateur d'hystérésis.

**Hystérésis et muscle cardiaque.** Le muscle cardiaque présente des comportements élasto-plastiques modélisables avec les modèles précédents, voir section 3.3.1 le modèle (9) et section 6.3.2 le modèle (6.3.2). La situation est ici particulièrement intéressante car des descriptions fines de la constitution des muscles étant disponibles, on comprend l'origine physique de ces modèles.

## 3.2 Analyse et commande de systèmes à hystérésis ou à retards

### 3.2.1 Comportement qualitatif de systèmes non linéaires. Problèmes de stabilité et d'oscillations

**Participants :** Pierre-Alexandre Bliman, Michel Sorine.

**Mots clés :** hystérésis, cycle d'hystérésis, solution périodique, systèmes à retards, saturations, stabilité, santé, ingénierie, environnement.

**Résumé :** *On étudie des problèmes de comportement qualitatif de systèmes qui sont non linéaires, du fait d'hystérésis ou de saturations et présentent des retards. On examine en particulier des problèmes de stabilité et d'oscillations. Des exemples d'applications, traitées dans le projet, sont présentés.*

Les systèmes non-linéaires sont connus pour exhiber une gamme très riche de comportements qualitatifs : équilibres multiples, cycles-limites forcés ou autonomes, bifurcations, chaos. En plus des problèmes plus classiques de stabilité de l'équilibre, l'étude des oscillations s'est peu à peu constituée comme un domaine à part entière au sein de l'Automatique (« Contrôle des oscillations et du chaos », voir par exemple les « Proceedings 1st Conf. on control of oscillations and chaos, St-Petersburg, Sept. 1997 »). Les modèles que nous utilisons comportant des éléments connus pour provoquer des oscillations en boucle fermée, tels qu'hystérésis ou retards, nous nous sommes naturellement tournés vers ce domaine.

- Pour le frottement, les régimes périodiques interviennent par exemple lors de l'utilisation de « dither », vibration rapide que l'on impose au système pour réduire le frottement. Ces régimes

---

[ALS96] 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.

peuvent également être gênants, provoquant des blocages intermittents du mouvement (« stick-slip ») ; on cherche alors à les éviter<sup>[PS95]</sup>.

- Pour le pot catalytique, la richesse des gaz à l'entrée est oscillante, du fait de l'utilisation d'un capteur tout-ou-rien (sonde lambda) dans la boucle de régulation de richesse : on parle de battements de sonde. Dans ce cas, les oscillations, dues à un retard dans la boucle (imputable physiquement aux différents temps du moteur et au transport des gaz jusqu'à la sonde), sont inévitables. On cherchera par exemple à en contrôler la période et l'amplitude<sup>[APS97]</sup>. Cet aspect d'identification et de réglage du système à partir des propriétés des oscillations est présent dans la fameuse méthode de Ziegler et Nichols<sup>[JN42]</sup>.

- Pour le muscle cardiaque, les battements du cœur agissent comme une excitation périodique sur le système circulatoire, le SNA contrôlant les caractéristiques de cette entrée, voir la section 4.3.1.

Ces diverses situations dans lesquelles il s'agit d'analyser, de contrôler ou d'identifier des systèmes du type de celui représenté sur la figure 1, conduisent à considérer pour ces systèmes une classe de problèmes : oscillations forcées<sup>[PAS95]</sup>, stabilité des cycles, résonance paramétrique<sup>[?]</sup>, observabilité. . .

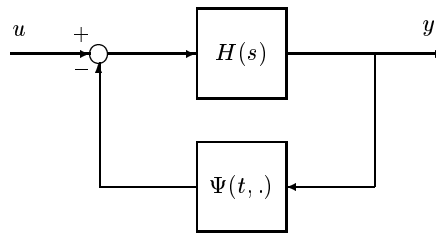


FIG. 1 – Système semi-linéaire

$H$  est un opérateur linéaire, comportant éventuellement des retards,  $\psi$  une non-linéarité éventuellement partiellement hystérétique,  $u$  représente les entrées commandées, mais aussi les

- 
- [PS95] P.-A. BLIMAN, M. SORINE, « Easy-to-use realistic dry friction models for automatic control », in : *Proc. of the 3rd European Control Conference*, Rome, 1995.
- [APS97] K. AOUCICHE, P.-A. BLIMAN, M. SORINE, « P.I. control of periodic oscillations of relay systems », in : *Proc. of 1st Conference on Control of Oscillations and Chaos*, St-Petersburg, Russia, August 27-29 1997.
- [JN42] J.G. ZIEGLER, N.B. NICHOLS, « Optimum settings for automatic controllers », *Trans. Amer. Soc. Mech. Engrs* 64, 1942, p. 759–768.
- [PAS95] P.-A. BLIMAN, A.M. KRASNOSEL'SKII, M. SORINE, « Dither in systems with hysteresis », *rapport de recherche n° 2690*, Inria, 1995, <http://www.inria.fr/rrrt/rr-2690.html>.
- [?] \*\*\* ERROR: citation '**Resonance96**' undefined \*\*\*

bruits. Par exemple, le modèle (6) du pot catalytique est de ce type :

$$\dot{\mathcal{R}} = -\frac{Vg}{L}(\mathcal{R} - \mathcal{R}^{in}) + K(\mathcal{H}(\mathcal{R}) - \theta_s(0)).$$

L'étude de ces problèmes fait appel à un large spectre de méthodes de l'analyse fonctionnelle.

### 3.2.2 Commande robuste de systèmes à retards

**Participants** : Catherine Bonnet, Jonathan Partington, Michel Sorine.

**Mots clés** : systèmes à retards, commande robuste, saturations, marge optimale de robustesse, stabilisation, distance à l'instabilité, santé, ingénierie, environnement stabilité.

**Résumé** : *Les techniques de commande robuste sont très utiles en présence d'erreurs de modélisation structurelles du système à commander. Les idées de base de ces techniques ne sont pas limitées au cas linéaire de dimension finie, comme on le montre ici à propos de systèmes à retard éventuellement non linéaires rencontrés dans nos applications. L'idée de marge optimale de robustesse pour un contrôleur stabilisant s'étend aussi : des résultats de paramétrisation de l'ensemble des contrôleurs stabilisants permettent l'optimisation sur cet ensemble d'une distance à l'instabilité du système bouclé.*

Notre intérêt pour les systèmes à retards vient en particulier de problèmes rencontrés lors de la dépollution de moteurs thermiques comme la régulation de la richesse. Il s'agit de régler la durée d'injection d'essence, en fonction de la masse d'air admise, pour réguler la richesse des gaz d'échappement du moteur qui peut être mesurée par une sonde proportionnelle (elle fournit la valeur de la richesse) ou une sonde lambda (sonde tout-ou-rien indiquant la position par rapport à la stœchiométrie : le gaz est riche ou pauvre). En pratique, il est suffisant de représenter la relation durée d'injection / richesse par un système différentiel linéaire du premier ordre, à retard, stable. La masse d'air admise est vue comme une entrée de perturbation. La fonction de sortie est non linéaire (fonction signe) dans le cas de la sonde lambda. La simplicité de cette modélisation doit être compensée par la robustesse de la commande de durée d'injection.

Les problèmes d'automatique posés dans cette application ont été formalisés par la classe suivante de problèmes génériques : *régulation (optimale) et stabilisation robuste (optimale) de systèmes à retards équipés de capteurs linéaires ou non linéaires dans un cadre entrée-sortie  $L^\infty$  (Bounded Input Bounded Output).*

L'approche suivie pour étudier ces problèmes utilise des opérateurs entrée / sortie temporels ou fréquentiels. Elle est adaptée à l'étude de la robustesse : l'utilisation de distances entre graphes d'opérateurs (« Gap metric ») permet la prise en compte de larges classes de perturbations du système à contrôler<sup>[Vid85, TM90, TM95]</sup>, incluant des perturbations sur le retard. Dans ce qui suit

[Vid85] M. VIDYASAGAR, *Control System Synthesis*, MIT Press, 1985.

[TM90] T.T. GEORGIU, M.C. SMITH, « Optimal robustness in the gap metric », *IEEE Transactions on automatic control* 35, 6, 1990, p. 673–686.

[TM95] T.T. GEORGIU, M.C. SMITH, « Metric uncertainty and nonlinear feedback stabilization », in : *Feedback control, nonlinear systems, and complexity*, Springer (éditeur), *Lecture Notes in Control and Inform. Sci.*, 202, p. 88–98, 1995.

l'espace des opérateurs est muni de la topologie associée. Cette approche a également l'avantage d'unifier l'étude des cas linéaires et de cas non linéaires (on utilise alors les opérateurs temporels). La stabilité est définie, dans ce contexte entrée / sortie, à partir des propriétés de bornitude de l'opérateur. Dans le cas linéaire, elle est définie de façon équivalente à partir de la norme du transfert dans  $\hat{\mathcal{A}}(0)$ , algèbre des transformées de Laplace des noyaux de convolution du type « fonction  $L^1$  + somme absolument convergente de Dirac retardés » (voir le livre de Curtain et Zwart<sup>[RH95]</sup> pour une introduction à ces notions).

Les problèmes de contrôle que nous considérons sont illustrés par la figure 2 dans laquelle  $r$  est

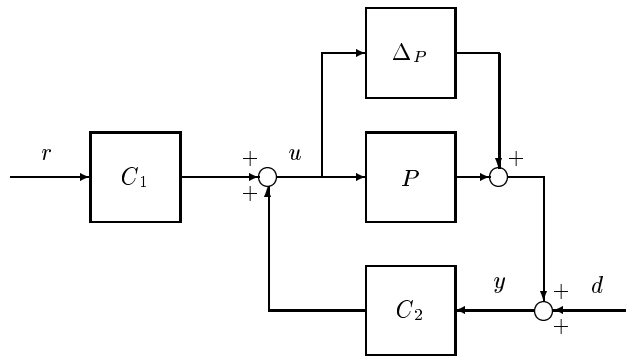


FIG. 2 – Implémentation idéalisée d'un contrôleur à deux degrés de liberté  $C_1$ ,  $C_2$ .

le signal de référence auquel doit « ressembler » la sortie  $y$  pour une entrée  $u$  bien choisie, et ce malgré les entrées de perturbation comme  $d$  ou les perturbations structurelles comme  $\Delta_P$ . Il est apparu qu'un schéma de commande intéressant pour notre problème est celui du contrôleur à deux degrés de liberté, ici  $C_1$  et  $C_2$  puisqu'il permet de traiter les problèmes de stabilisation et de régulation de manière indépendante.

**Le cas linéaire.** Nous avons étudié les systèmes à retards du type :

$$P(s) = \frac{h_2(s)}{h_1(s)} \quad \text{où} \quad h_1(s) = \sum_{i=0}^{n_1} p_i(s)e^{-\gamma_i s}, \quad h_2(s) = \sum_{i=0}^{n_2} q_i(s)e^{-\beta_i s}$$

avec  $0 = \gamma_0 < \gamma_1 \cdots < \gamma_{n_1}$ ,  $0 \leq \beta_0 < \beta_1 \cdots < \beta_{n_2}$ ,

les  $p_i$  sont des polynômes de degré  $\delta_i$  et  $\delta_i < \delta_0$  pour  $i \neq 0$  et les  $q_i$  sont des polynômes de degré  $d_i < \delta_0$  pour tout  $i$ . En particulier  $(1+s)^{-\delta_0}h_1(s)$  et  $(1+s)^{-\delta_0}h_2(s)$  sont des éléments de  $\hat{\mathcal{A}}(0)$  dont le rapport est aussi  $P(s)$ .

Les systèmes de ce type appartiennent à la classe de Callier-Desoer  $\hat{\mathcal{B}}(0)$  et admettent une factorisation coprime  $(N, D)$  sur  $\hat{\mathcal{A}}(0)$  :

$$P = ND^{-1} \quad \text{avec} \quad -NX + DY = 1 \quad \text{et} \quad N, D, X, Y \in \hat{\mathcal{A}}(0)$$

---

[RH95] R.F. CURTAIN, H.J. ZWART, *An Introduction to Infinite-Dimensional Linear systems Theory*, Springer-Verlag, 1995.



Nous avons déterminé [9] une expression explicite des facteurs de Bézout  $(X, Y)$ . Cela permet de calculer tous les contrôleurs  $C$ , à un ou deux degrés de liberté, stabilisant  $P$ . Ces contrôleurs sont de la forme  $C_1 = I$  et  $C_2 = (Y + NQ)^{-1}(X + DQ)$ , avec  $Q \in \hat{\mathcal{A}}(0)$  (contrôleur à un degré de liberté,  $Q$ ) et  $C_1 = (Y + NQ)^{-1}U$ ,  $C_2 = (Y + NQ)^{-1}(X + DQ)$ , avec  $U, Q \in \hat{\mathcal{A}}(0)$  (contrôleur à deux degrés de liberté,  $Q$  et  $U$ ).

*Le problème de régulation optimale.* Il s'agit de trouver  $U^{opt}$  tel que le gain entre la référence  $r$  et l'erreur de régulation  $y - r = -(I - NU)r + (Y + QN)Dd$ , soit minimal :

$$\|W(I - NU^{opt})\|_{\hat{\mathcal{A}}(0)} = \inf_{U \in \hat{\mathcal{A}}(0)} \|W(I - NU)\|_{\hat{\mathcal{A}}(0)}, \quad (7)$$

où  $W$  est un filtre choisi pour améliorer la qualité de la poursuite dans une certaine bande de fréquence.

L'implémentation correcte de ce contrôleur est représentée figure 3 dans le cas de deux degrés

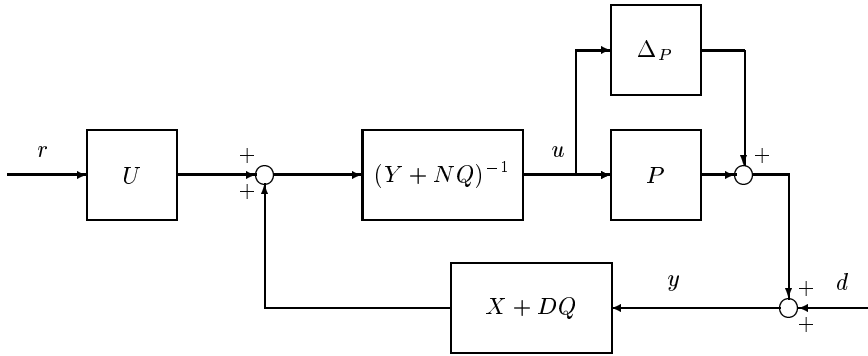


FIG. 3 – Implémentation réaliste d'un contrôleur à deux degrés de liberté  $U, Q$ .

de liberté. Le feedforward est ici  $U$  (qui est stable) au lieu de  $C_1$  (qui peut être instable), ce qui est nécessaire pour la stabilité interne. Nous avons obtenu une solution de ce problème d'optimisation, entre autres, dans le cas où  $N(s) = \frac{e^{-sT}}{s+\gamma}$ ,  $\gamma > 0$  (cas du moteur).

*Le problème de stabilisation robuste optimale* est le suivant : un contrôleur stabilisant en présence de la perturbation  $\Delta_P$  doit maintenant être déterminé à partir du modèle  $(N, D)$  qui n'est qu'approché. La démarche pour déterminer un contrôleur satisfaisant est la suivante : nous savons<sup>[Vid85]</sup> que pour chaque contrôleur  $C = (Y + NQ)^{-1}(X + DQ)$ , il existe un voisinage de  $P$ ,

$$\mathcal{V}(N, D, a) = \{P + \Delta_P = \frac{N + \Delta_N}{D + \Delta_D} \text{ tel que } \|(\Delta_N, \Delta_D)\| < a\}$$

tel que  $C$  stabilise non seulement  $P$  mais également tous les systèmes dans  $\mathcal{V}$ .

---

[Vid85] M. VIDYASAGAR, *Control System Synthesis*, MIT Press, 1985.

La marge de robustesse (distance à l'instabilité)  $b_C$  de  $C$  représente la taille de ce voisinage : si  $\|(\Delta_N, \Delta_D)\| < b_C$ ,  $C$  stabilise  $\frac{N+\Delta_N}{D+\Delta_D}$  et il existe un couple  $(\Delta_N^0, \Delta_D^0)$  de norme  $b_C$  tel que  $C$  ne stabilise pas  $\frac{N+\Delta_N^0}{D+\Delta_D^0}$ .

On cherche alors le contrôleur  $C^{opt}$  qui possède la plus grande marge de robustesse  $b_C^{opt} = \sup_C b_C$ . Cela revient à trouver  $Q^{opt}$  tel que

$$\left\| \begin{pmatrix} X \\ Y \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} D \\ N \end{pmatrix} Q^{opt} \right\|_{\infty} = \inf_{Q \in H_{\infty}} \left\| \begin{pmatrix} X \\ Y \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} D \\ N \end{pmatrix} Q \right\|_{\infty}, \quad (8)$$

problème d'optimisation  $H_{\infty}$  qui se posait déjà dans le cadre  $L^2$  (contrôleur  $H_{\infty}$ -optimal déterminé par Georgiou et Smith [DTM95]) et pour lequel on ne connaît pas d'expression explicite de la solution lorsque  $N, D, X, Y$  ne sont pas rationnels. Une méthode d'approximation est donc utilisée.

Le cadre  $L^{\infty}$  se révèle avantageux ici par rapport au cadre  $L^2$  puisqu'il est possible (dans le cas où la plus grande valeur singulière de  $D^*X + N^*Y$  est de multiplicité égale à un) de construire un approximant de  $Q^{opt}$  dans  $\hat{\mathcal{A}}(0)$  à partir d'approximants des facteurs coprimés de  $P$ . On obtient ainsi dans ce cas la convergence du contrôleur optimal du système de dimension finie vers celui du système initial ainsi que la convergence de leurs marges de robustesse.

**Le cas non linéaire.** Dans le cas de capteurs ou actionneurs non linéaires, nous avons restreint l'étude aux systèmes à retards du type  $P(s) = e^{-sT}R(s)$  où  $R$  est :

- rationnel dans le cas d'un actionneur non linéaire,
- rationnel stable dans le cas d'un capteur non linéaire de type tout-ou-rien ou saturation.

Dans le premier cas on s'appuie sur un résultat de Verma [Ver88] décrivant l'ensemble des contrôleurs non linéaires stabilisant un système linéaire. La stabilisation d'un système à retard (non nécessairement stable) est étudiée suivant cette approche dans [7].

Dans le deuxième cas nous avons repris un schéma de contrôleur à deux degrés de liberté [6, 7]. Il s'est avéré que le problème de poursuite se pose, dans ce cas, dans les mêmes termes que dans le cas linéaire, ce qui permet l'utilisation des résultats d'optimisation dans  $\hat{\mathcal{A}}(0)$  obtenus précédemment. La stabilité de la boucle fermée est analysée pour trois types d'opérateurs : bornés (encore dits « gf-stable » car on peut leur associer une « gain-fonction » qui associe au rayon d'une boule la borne de l'ensemble image), uniformément bornés (ou « norme-stable ») ou uniformément Lipschitz (« incrementally stable ») [TM97]. Nous avons proposé une famille de contrôleurs non linéaires qui stabilisent de façon incrémentale la boucle fermée en présence de l'opérateur de saturation ou de l'opérateur signe. Dans le cas du signe, la robustesse ne peut être analysée que suivant la gf-stabilité ; cependant, dans le cas où la poursuite est réalisée, nous obtenons des conditions garantissant la norme-stabilité de la boucle fermée (les contrôleurs sont donc localement norme-stabilisant). Dans le cas d'une saturation, la robustesse est analysée

- 
- [DTM95] H. DYM, T.T. GEORGIU, M.C. SMITH, « Explicit formulas for optimally robust controllers for delay systems », *IEEE Transactions on Automatic Control* 40, 1995, p. 656–669.
- [Ver88] M. VERMA, « Coprime fractional representations and stability of non-linear feedback systems », *International Journal of Control* 48, 1988, p. 897–918.
- [TM97] T.T. GEORGIU, M.C. SMITH, « Robustness analysis of nonlinear feedback systems: an input-output approach », *IEEE Transactions on automatic control* 42, 9, 1997, p. 1200–1221.

suivant la norme-stabilité. Pour une sous-classe de contrôleurs, nous obtenons des marges de robustesse relativement à la stabilité incrémentale.

### 3.3 Modélisation et commande de systèmes physiologiques.

**Participants :** Jean Clairambault, Frédérique Clément, Claire Médigue, Alessandro Monti, Michel Sorine.

**Mots clés :** santé, systèmes physiologiques, diagnostic, système cardio-respiratoire, système nerveux autonome, mécanique cardiaque, fonction de reproduction, commande pharmacologique, analyse de signaux.

**Résumé :** *L'étude des systèmes physiologiques, de leurs dysfonctionnements et de leurs traitements peut tirer profit des méthodes de l'automatique : modélisation, identification, commande. C'est cette approche qui est choisie pour étudier le système cardio-respiratoire (conjointement avec les méthodes de traitement du signal) et le système de reproduction.*

#### 3.3.1 Modélisation mécanique du myocarde.

**Participants :** Frédérique Clément, Michel Sorine.

Les modèles mathématiques de la contraction musculaire vont de modèles « boîte noire » à des « modèles de connaissance ». Les premiers ont l'avantage d'être identifiables à l'aide des mesures disponibles (applications visées : surveillance et aide au diagnostic), les seconds sont les plus conformes possible aux connaissances physiologiques (applications visées : représentation des connaissances, études de comportements qualitatifs).

Nous recherchons des modèles intermédiaires, au sens où ils sont identifiables à partir de mesures correspondant à des expériences faisables à l'échelle du muscle, tout en étant compatibles avec les connaissances sur les comportements qualitatifs du niveau des nanomoteurs moléculaires à celui du muscle entier, en passant par le niveau cellulaire. Cela a conduit à un problème de prise en compte de phénomènes intervenant depuis l'échelle moléculaire (le nanomètre : c'est à cette échelle qu'intervient naturellement la commande chimique par le calcium) jusqu'à celle du muscle cardiaque (étude théorique du passage d'une échelle à l'autre).

Nous présentons ici quelques données de ce problème (pour une introduction aux éléments de physiologie et de modélisation, voir par exemple le traité de G. Chauvet<sup>[Cha87]</sup>).

à l'échelle du nanomètre, l'unité musculaire correspond aux têtes des molécules de myosine et à leurs sites de fixation sur l'actine. La fixation d'un ion Calcium sur la troponine autorise la fixation d'une tête de myosine sur un site d'actine. Le mouvement provient du couplage des interactions actine/myosine avec le cycle chimique de l'ATP (voir infra).

à l'échelle du micromètre, l'unité musculaire est le sarcomère constitué d'une alternance de filaments minces (d'actine) et de filaments épais (de myosine). Sous l'influence de la concentration de Calcium, des « ponts » élastiques peuvent se créer entre ces filaments, les faisant

---

[Cha87] G. CHAUVET, *Traité de Physiologie théorique, tome 2*, Masson, 1987.

glisser les uns par rapport aux autres et créant ainsi le mouvement. Le *modèle du filament glissant de Huxley* donne une description statistique de ce phénomène, permettant de passer de l'échelle de ces ponts (quelques dizaines de nanomètres) à celle du sarcomère.

à l'échelle de quelques millimètres à quelques centimètres, le muscle est constitué d'un nombre important de fibres musculaires de faible diamètre (exemple : 270 000 pour le *biceps femoris*). L'ordre de contraction est donné par un neurone (motoneurone) qui innerve un ensemble de fibres musculaires constituant une unité motrice. On dénombre 450 unités motrices pour le muscle *biceps femoris*. Plusieurs tentatives de modélisation ont été faites à ce niveau. Nous avons obtenu un modèle en sommant les forces décrites par le modèle de Huxley. Dans le cas particulier d'un muscle non commandé, cela a conduit à retrouver le *modèle de Mirsky*, modèle « boîte noire » initialement proposé pour représenter la relation contrainte ( $\sigma_x$ ) / déformation ( $\varepsilon_x$ ) observée<sup>[MW73]</sup> :

$$\dot{\sigma}_x = k_{1x}\sigma_x|\dot{\varepsilon}_x| + k_{2x}\dot{\varepsilon}_x \quad (9)$$

Le modèle (9) est du type modèle de Dahl (voir (5)). Il est *hystérétique* et *dissipatif* pour  $k_{1x} < 0$  et  $k_{2x} > 0$ .

à l'échelle du muscle entier, on distingue des parties actives (capables de se raccourcir sous l'ordre d'une commande nerveuse), d'autres passives (leur déformation est la conséquence de la contraction des parties actives). Les premières sont rassemblées et appelées *élément contractile* : EC. Le modèle rhéologique de EC est un « ressort non linéaire commandé ». C'est sur lui que portent principalement nos efforts de recherche.

Le *modèle de Hill* est un modèle global du muscle qui peut s'obtenir ainsi : en série avec EC, on place un second ressort ES. Ainsi, on rend compte du fait que le muscle peut être activé, donc développer une force, sans que sa longueur totale change (contraction isométrique : la longueur de chacun des deux ressorts peut varier tout en maintenant la longueur totale constante). En parallèle à ce montage série, on fixe un troisième ressort : EP qui, lui, rend compte du fait que le muscle ne peut pas être étiré sans limite (la force de rappel créée par cet élément devient non négligeable à partir d'une certaine longueur).

Ces trois éléments EC, ES, et EP sont de même nature : comportement élasto-plastique. Pour ES et EP qui sont passifs, on a une relation liant contrainte - déformation du type (9).

à l'échelle du cœur entier, chaque ventricule est maintenant modélisé par un assemblage EC, ES, EP, la relation contrainte - déformation devenant :

$$\begin{cases} \sigma = \sigma_{EP} + \sigma_{EC}, & \sigma_{EC} = \sigma_{ES} \\ \varepsilon = \varepsilon_{EP} = \varepsilon_{EC} + \varepsilon_{ES} \end{cases} \quad (10)$$

La relation pression - volume résulte alors d'une approximation des relations volume - déformation et pression - contrainte.

---

[MW73] I. MIRSKY, W.W. PARMLEY, « Assessment of Passive Elastic Stiffness for Isolated Heart Muscle and the Intact Hart », *Circulation Research XXXIII*, 1973, p. 233 - 243.

### 3.3.2 Analyse et modélisation du système cardio-respiratoire et de ses mécanismes de régulation

**Participants :** Claire Médigue, Alessandro Monti, Michel Sorine.

Ce thème aborde conjointement l'analyse des signaux et la modélisation. L'analyse des signaux observés dans diverses situations, physiologiques et pathologiques, fournit des informations qualitatives utiles pour la modélisation du système, puis pour l'identification des paramètres. Certains paramètres peuvent constituer des indicateurs de l'état, bon ou mauvais, du système. Ces informations synthétiques (elles résultent du traitement de grosses quantités de signaux) sont utiles pour le diagnostic. Le suivi en temps réel de certains indicateurs devient possible, ce qui devrait fournir aux cliniciens de nouveaux outils de surveillance-diagnostic. Le point de vue de la commande peut être aussi utile : dans ce cas la modélisation d'un système rend compte des points d'entrée, en particulier pharmacologiques, qui permettent de modifier son comportement. On peut ainsi déterminer des stratégies thérapeutiques. Indiquons finalement que l'utilisation du modèle en simulation permet de faire de la prédiction de comportement qualitatif ou quantitatif, intéressant l'enseignement.

Le système cardio-vasculaire (SCV) contrôlé par le système nerveux autonome (SNA) constitue, pour l'automatisme, un système en boucle fermée ; nous étudions ainsi la boucle de régulation à court terme de la pression artérielle ou arc baroréflexe, où le système nerveux autonome (SNA) est le contrôleur, le barorécepteur artériel le capteur principal, et le coeur, l'actionneur principal. Le système respiratoire (SR) est, lui aussi, contrôlé par le SNA et constitue un système en boucle fermée qui règle à long terme la pression partielle en oxygène dans le sang : le SNA est le contrôleur, les chémorécepteurs les capteurs principaux et les muscles respiratoires les actionneurs. Les deux systèmes sont supposés interagir à plusieurs niveaux.

### 3.3.3 Modélisation d'activités rythmiques d'origine centrale.

**Participants :** Jean Champagnat, Daniel Claude, Gilles Fortin, Alessandro Monti.

Cette problématique s'inscrit dans le cadre des couplages activateurs-inhibiteurs qui sont très souvent à l'origine des rythmes biologiques endogènes. Afin de mieux comprendre la genèse de certains rythmes d'origine centrale et en particulier du rythme respiratoire, nous avons choisi d'étudier le réseau neuronal rythmogène respiratoire du tronc cérébral embryonnaire. Ce thème de recherche est basé sur des résultats expérimentaux récents qui ont mis en évidence, chez la plupart des espèces animales, des structures neuronales primordiales à l'origine du rythme respiratoire. Dès les premiers stades embryonnaires, une activité rythmique, composée de la répétition périodique d'épisodes de décharges neuronales par bouffées, apparaît sur les nerfs moteurs du tronc cérébral. Elle est due à un réseau limité à quelques types de neurones découvert notamment chez l'embryon de poulet [CF97,F<sup>+</sup>95,Mét96]. Au cours du développement,

---

[CF97] J. CHAMPAGNAT, G. FORTIN, « Primordial respiratory like rhythm generation in the vertebrate embryo. », *Trends Neuroscience* 20, 1997, p. 119–124.

[F<sup>+</sup>95] G. FORTIN *et al.*, « Rhythm generation in the segmented hindbrain of chick embryos. », *J. Physiol.* 486, 1995, p. 735–744.

[Mét96] A. L. MÉTAYER, « Activité rythmique primordiale dans le tronc cérébral isolé embryonnaire de

la composante de base, ou rhombomère, se réplique pour former le réseau rhombomérique. Des connexions neuronales entre les rhombomères assurent alors la synchronisation des différentes activités pour donner lieu au comportement rythmogène de l'ensemble [CF97]. Même si les différents types de neurones ont été identifiés, le schéma exact de leurs connexions réciproques (activatrices, inhibitrices et neuromodulatrices) reste inconnu, autant à l'intérieur de chaque rhombomère, qu'entre les différents rhombomères.

Le modèle proposé avec sa simulation permet de formuler des hypothèses concernant ces couplages activateurs-inhibiteurs, hypothèses que les résultats expérimentaux permettent de confirmer ou d'infirmer. Il fournit un début d'explication sur la genèse des épisodes de décharges neuronales et leur contrôle, en amplitude et en fréquence, grâce au couplage des actions activatrices-inhibitrices et neuromodulatrices, tout en proposant un mode de fonctionnement possible de la commande centrale de la respiration automatique chez le sujet adulte.

### 3.3.4 La fonction de reproduction vue sous l'angle de la commande

**Participants :** Daniel Claude, Frédérique Clément.

La modélisation mathématique de la fonction de reproduction chez les mammifères a pour but d'intégrer le corpus de connaissances accumulées sur l'axe reproducteur chez les mammifères, tant chez la femelle que chez le mâle. Notre activité de recherche concerne essentiellement la fonction de reproduction femelle, et plus précisément la modélisation et la commande de la fonction ovarienne.

Tout au long de la vie reproductive des femelles de mammifères, l'ovaire est le siège d'un phénomène très particulier appelé folliculogénèse, qui se définit comme l'ensemble des processus de croissance et de maturation fonctionnelle subis par les follicules ovariens depuis leur sortie de la réserve de follicules primordiaux jusqu'à l'ovulation. Sa finalité biologique est la production, lors de chaque cycle ovarien, d'un (pour les espèces mono-ovulantes) ou de plusieurs (pour les espèces poly-ovulantes) ovocyte(s) aptes à la fécondation et au développement. En fait, la plupart des follicules n'atteignent jamais le stade ovulatoire, mais subissent un processus de dégénérescence, l'atrésie.

Le succès ovulatoire est une composante essentielle du succès reproductif dans son ensemble, et une meilleure compréhension des événements menant à l'ovulation est un préalable indispensable à l'amélioration des protocoles de maîtrise du cycle ovarien, à visée thérapeutique dans l'espèce humaine ou zootechnique chez les mammifères domestiques, avec l'espoir de retombées significatives respectivement en terme de santé (fertilité) et de rentabilité économique.

Le développement folliculaire terminal est sous le contrôle des gonadotropines hypophysaires, FSH (Follicle Stimulating Hormone) et LH (Luteinizing Hormone). En retour, les produits de sécrétion des cellules folliculaires, notamment l'œstradiol, régulent les niveaux de sécrétion des gonadotropines. FSH et LH peuvent être considérées comme des entrées de commande agissant sur la fonction ovarienne, tout d'abord indépendamment du rétrocontrôle ovarien qu'elles subissent, puis au sein d'une représentation complète de la boucle de rétroaction entre hypophyse

---

poulet. », *Rapport DEA de Neurosciences n° 22 p.*, Paris VI, XII University, 1996.

[CF97] J. CHAMPAGNAT, G. FORTIN, « Primordial respiratory like rhythm generation in the vertebrate embryo. », *Trends Neuroscience* 20, 1997, p. 119-124.

et ovaires. L'action des gonadotropines se fait à l'échelle cellulaire et il est donc nécessaire de caractériser et de comprendre les changements qui s'opèrent au niveau de la cellule de granulosa au cours du développement folliculaire.

### 3.3.5 Modélisation et commande pharmacologique de systèmes physiologiques altérés.

**Participants :** Jean Clairambault, Daniel Claude.

Un système physiologique sera dit *altéré* lorsque son fonctionnement normal est perturbé à cause d'une mutation génétique, ou à la suite d'une agression, externe (par exemple microbienne) ou interne (notamment tumorale ou auto-immune). Quand elles sont efficaces sur les cellules cibles (bactéries pathogènes, cellules cancéreuses), les drogues utilisées en thérapeutique humaine pour combattre cette agression et administrées par voie générale, peuvent être toxiques pour certaines des cellules saines du système physiologique considéré (l'organisme entier, ou le sous-ensemble constitué de l'agent agresseur et des systèmes physiologiques sensibles à l'action de la drogue utilisée : hématologique, rénal, ORL, etc.) ; la marge est parfois étroite entre efficacité thérapeutique et toxicité, en particulier en cancérologie, où toute action efficace est malheureusement toxique.

Une voie thérapeutique classique consiste à utiliser ou fabriquer des vecteurs de la drogue qui soient extrêmement spécifiques de la cellule cible ; mais cette méthode, déjà explorée depuis de nombreuses années, n'est pas toujours facile à mettre en pratique, à cause notamment du manque de connaissances disponibles sur les différences de propriétés physiques entre cellules saines et cellules cibles, mais aussi de la difficulté de trouver de tels vecteurs spécifiques.

Une autre approche, qui relève de la chronobiologie, consiste à jouer sur les différences de rythmes existant entre cellules saines et cellules cibles. Si la simple modification de la période du cycle de base suffisait à transformer les cellules au rythme anormal en cellules saines, on serait alors bien près du résultat, car nous avons montré <sup>[CC00]</sup> qu'en théorie il est possible de ramener la période « pathologique » à une valeur « physiologique » par entraînement (externe) du système soumis à une perfusion intermittente périodique d'agents pharmacologiques. Mais en général ce procédé ne suffit pas, d'une part parce que la période du cycle de base ne résume à l'évidence pas toutes les propriétés de la cellule, d'autre part parce que cellules saines et cellules cibles ont parfois des rythmes de période identique. On peut cependant jouer sur les *différences de phase* existant entre les deux populations : si la drogue utilisée atteint les cellules cibles à un moment de leur cycle où elles sont plus sensibles, tandis que les cellules saines le sont moins, l'effet thérapeutique sera maximum. Cette idée est déjà exploitée en cancérologie, avec des résultats publiés <sup>[LZB<sup>+</sup>99]</sup>.

---

[CC00] D. CLAUDE, J. CLAIRAMBAULT, « Period shift induction by intermittent stimulation in a *Drosophila* model of PER protein oscillations », *Chronobiology International*, 2000, p. 1–14.

[LZB<sup>+</sup>99] F. LÉVI, R. ZIDANI, S. BRIENZA, L. DOGLIOTTI, B. PERPOINT, M. ROTARSKI, Y. LETOURNEAU, J.-F. LLORY, P. CHOLLET, A. LE ROL, A. KANOUI, C. FOCAN, S. GIACCHETTI, F. BERTHEAULT-CVITKOVIC, F. KUNSTLINGER, R. ADAM, M. ITZHAKI, C. JASMIN, J.-L. MISSET, « A multicenter evaluation of intensified ambulatory chronomodulated chemotherapy with oxaliplatin, fluorouracil and leucovorin as initial treatment of patients with metastatic colorectal cancer », *Cancer*, 1999, p. 2532–2540.

### 3.4 Méthode d'« Adéquation Algorithme Architecture »

**Participants :** Liliana Cucu, Thierry Grandpierre, Rémy Kocik, Yves Sorel.

**Mots clés :** contrôle, commande, traitement du signal, traitement d'image, prototypage rapide, co-design, CAO système, langages synchrones, multiprocesseur, parallèle, distribué, réparti, temps réel, embarqué, optimisation, ordonnancement, exécutif.

**Résumé :** *La méthodologie « Adéquation Algorithme Architecture » (AAA) vise le prototypage rapide et l'implantation optimisée d'applications distribuées temps réel embarquées devant être tolérantes aux pannes, telles celles rencontrées en commande de systèmes complexes comprenant aussi du traitement du signal et des images. Elle est fondée sur des modèles de graphes, autant pour spécifier les Algorithmes applicatifs et les Architectures matérielles distribuées comportant un certain niveau de redondance, que pour déduire les implantations possibles en termes de transformations de graphes. L'Adéquation revient à résoudre un problème d'optimisation consistant à choisir une implantation dont les performances, déduites des caractéristiques des composants matériels, respectent les contraintes temps réel et d'embarquabilité, et exploitent la redondance matérielle pour effectuer de la tolérance aux pannes par redondance logicielle automatique. Dans le cas du temps réel critique nous privilégions les approches statiques en introduisant le minimum de décisions dynamiques, i.e. uniquement quand elles sont inévitables. Tout cela permet de générer automatiquement d'une part des exécutifs distribués temps réel à faible surcoût pour les composants processeurs, et d'autre part des « net-list » pour les composants circuits intégrés spécifiques, supportant tous ensemble (« codesign ») l'exécution tolérante aux pannes de l'algorithme sur l'architecture.*

#### 3.4.1 Contexte et objectifs

Nos recherches concernent la programmation efficace de systèmes informatiques pour des applications de commande et de traitement du signal et des images, soumises à des contraintes temps réel et d'embarquabilité devant être tolérantes aux pannes, comme on en rencontre dans les domaines du transport (avionique, automobile), des télécommunications etc. . .

Dans ces applications, le système programmé et/ou câblé « contrôle » son environnement en produisant, par l'intermédiaire d'actionneurs (réactions), une commande qu'il calcule à partir de son état interne et de l'état de l'environnement, acquis par l'intermédiaire de capteurs (stimuli). C'est en ce sens que l'on parle de *systèmes réactifs* <sup>[BB91]</sup> : la commande est calculée en réaction à chaque stimulus. Une analyse mathématique du système de commande et de son environnement permet de déterminer, d'une part une borne supérieure sur le délai qui s'écoule entre deux échantillons (cadence ou période), et d'autre part une borne supérieure sur la durée du calcul (latence) entre une détection de variation d'état de l'environnement et la variation induite de la commande, bornes au delà desquelles l'environnement ne peut plus être contrôlé,

---

[BB91] A. BENVENISTE, G. BERRY, « The synchronous approach to reactive and real-time systems », in : *Proc. of the IEEE*, p. 79(9):1270-1282, September 1991.



ceci pouvant conduire à des conséquences catastrophiques. En plus de ces contraintes temps réel, l'application est soumise à des contraintes technologiques d'embarquabilité et de coût, qui incitent à minimiser les ressources matérielles (architecture) nécessaires à sa réalisation. Pour satisfaire les contraintes temps réel, et/ou pour rapprocher les ressources de calcul le plus près possible des capteurs et des actionneurs afin de limiter le coût du câblage et l'influence des radiations électromagnétiques, l'architecture est la plupart du temps *multicomposant* (parallèle, répartie, distribuée), composée de plusieurs processeurs et circuits intégrés spécifiques (ASIC<sup>1</sup> figé ou FPGA<sup>2</sup> reconfigurable).

La complexité des applications visées, au niveau des algorithmes, de l'architecture matérielle, et des interactions avec l'environnement sous contraintes temps réel, nécessite des méthodes pour minimiser la durée du cycle de développement, depuis la conception jusqu'à la mise au point, des prototypes ainsi que des « produits de série » obtenus à partir de ces prototypes, s'exécutant dans les deux cas en temps réel. Afin d'éviter toute rupture entre les différentes phases du cycle de développement et pour permettre des vérifications formelles et des optimisations, notre méthodologie « Adéquation Algorithme Architecture » (AAA) de *prototypage rapide optimisé* est fondée sur une approche globale, formalisant l'algorithme, l'architecture et les implantations possibles, à l'aide de graphes. L'intérêt principal de ce modèle réside dans sa capacité à *spécifier* à la fois du *parallélisme potentiel* dans le cas de l'algorithme (par exemple schémas-blocs utilisés dans Simulink) et du *parallélisme effectif* dans le cas de l'architecture (par exemple réseaux de composants programmables ou de fonctions logiques utilisés dans VHDL structurel), mais aussi de décrire l'implantation de l'algorithme sur l'architecture en termes de transformations de graphes (distribution et ordonnancement des calculs et des communications, synthèse des chemins de données et de contrôle), en supportant naturellement la notion de co-développement logiciel/matériel (codesign). Il permet de poser plus précisément les problèmes d'optimisation de l'implantation, de simplifier et de rendre plus efficace la génération automatique de code (exécutifs distribués temps réel ou « net-lists »).

### 3.4.2 Modèle d'algorithme

Un algorithme tel que défini par Turing et Post est une séquence (ordre total) finie d'opérations directement exécutable par une machine à états finie. Cette définition doit être étendue afin de permettre d'une part la prise en compte du parallélisme effectif des architectures distribuées, composées de plusieurs machines à états finies interconnectées, et d'autre part la prise en compte de l'interaction infiniment répétitive de l'application avec son environnement (systèmes réactifs). Pour cela notre modèle d'algorithme est un *graphe de dépendances de données conditionné factorisé* : c'est un hypergraphe orienté acyclique (DAG) [SH86], dont les sommets sont des *opérations* partiellement ordonnées [Pra86] (parallélisme potentiel) par leurs dépendances de

---

<sup>1</sup>ASIC : Application Specific Integrated Circuit

<sup>2</sup>FPGA : Field Programmable Gate Array

---

[SH86] V. SARKAR, J. HENNESSY, « Compile-Time Partitioning and Scheduling of Parallel Programs », in : *Symp. Compiler Construction*, N. Y. ACM Press (éditeur), 1986.

[Pra86] V. PRATT, « Modeling concurrency with partial orders », *International Journal of Parallel Programming* 15, 1, 1986.

données (hyperarcs orientés pouvant avoir plusieurs extrémités pour une seule origine, « diffusion »). L'exécution de chaque opération est conditionnée par une dépendance de donnée particulière « de conditionnement » (l'opération n'est exécutée que lorsque cette dépendance porte une certaine valeur). À chaque interaction avec l'environnement, concrétisée par un ensemble d'événements d'entrée issus des capteurs, les valeurs des arcs de conditionnement déterminent l'ensemble des opérations à exécuter pour obtenir les événements de sortie pour les actionneurs, à partir des valeurs d'entrée acquises par les capteurs. Chaque capteur produit une suite d'événements et chaque actionneur consomme une suite d'événements. La notion d'événement est prise au sens large, la suite d'événements formant un signal peut être périodique ou apériodique. L'algorithme est donc modélisé par un graphe de dépendances, infiniment large mais répétitif, réduit par factorisation à son motif répétitif <sup>[LS97]</sup>, généralement appelé *graphe flot de données*. De plus, un sous-graphe du graphe flot de données peut être répété un nombre fini de fois et peut contenir à son tour un sous-graphe lui aussi répété un nombre fini de fois (« nid de boucles »). Un sous-graphe répété un nombre fini de fois peut aussi être réduit par factorisation à son motif répétitif. Les frontières de factorisation sont matérialisées par des sommets particuliers qui servent à spécifier si la répétition est infinie ou finie, et dans ce dernier cas quel est le nombre de répétitions, ainsi qu'à spécifier le début ou la fin d'une factorisation. Dans le cas d'un sous-graphe factorisé représentant un sous-graphe répété N fois, le sommet de factorisation *Fork*, qui a comme entrée un tableau de N données, va produire sur ses N sorties les N éléments de ce tableau. Chacun des éléments va être utilisé comme entrée par chacune des répétition finie de sous-graphes. Inversement, le sommet *Join* qui a comme entrées les N éléments obtenus en sorties des N instances de répétition, produit en sortie le tableau formé de ces N éléments. Un Fork et un Join appartenant à une même frontière de factorisation correspondent au déroulement spatial d'une boucle (itération ou répétition temporelle) conduisant à du parallélisme potentiel de données (par opposition au parallélisme potentiel d'opérations ou de tâches) puisque le même graphe d'opérations est appliqué (répété spatialement) à des données différentes. On peut faire le même raisonnement pour les frontières de répétition infinies. On comprend aisément que l'on peut transformer une répétition spatiale en répétition temporelle et inversement.

Le conditionnement et la factorisation sont les équivalents, en termes de graphe de dépendances de données, des structures de contrôle respectivement « If...Then...Else » et « For i=1 to N Do... » que l'on trouve dans les langages impératifs. Ils ont comme principal avantage de permettre d'exprimer du parallélisme potentiel.

Le graphe de l'algorithme peut être soit directement spécifié comme tel, ou bien déduit d'une spécification séquentielle ou CSP (Communicating Sequential Processes de Hoare) par analyse de dépendances, ou encore produit par les compilateurs des langages synchrones (Esterel, Lustre, Signal, à travers leur format commun « DC ») <sup>[Hal93]</sup> qui présentent l'intérêt de faire des vérifications formelles en termes d'ordre sur les événements. De manière plus générale, tout langage de « haut niveau orienté métier » possédant une sémantique compatible avec celle des langages synchrones, est un candidat capable de produire lors de sa compilation un graphe de

---

[LS97] C. LAVARENNE, Y. SOREL, « Modèle unifié pour la conception conjointe logiciel-matériel », *Traitement du Signal* 14, 6, 1997.

[Hal93] N. HALBWACHS, *Synchronous programming of reactive systems*, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht Boston, 1993.

ce type. Par exemple, le langage AIL (Architecture Implementation Language) défini par les constructeurs et équipementiers français du domaine de l'automobile, le langage Scicos orienté vers la spécification d'applications d'automatique, le langage AVS orienté vers la spécification d'applications de traitement d'images, sont des langages de ce type.

### 3.4.3 Modèle d'architecture

Nous distinguons deux types d'architecture, celles que nous appelons multicomposant qui correspondent à l'interconnexion de composants programmables (processeurs) et de composants non programmables (circuits intégrés spécifiques) par l'intermédiaire d'un réseau, et celles des circuits intégrés spécifiques eux-mêmes.

Les modèles les plus classiquement utilisés pour spécifier une architecture multiprocesseur (multicomposant ne comportant pas de circuit intégré spécifique) parallèle ou distribuée, sont les PRAM (« Parallel Random Access Machines ») et les DRAM (« Distributed Random Access Machines ») [Zom96]. Le premier modèle correspond à un ensemble de processeurs communiquant par mémoire partagée alors que le second correspond à un ensemble de processeurs à mémoire distribuée communiquant par passage de messages. Si ces modèles sont suffisants pour décrire, sur une architecture homogène, la distribution et l'ordonnancement des opérations de calcul de l'algorithme, ils ne permettent pas de prendre en compte des architectures hétérogènes ni de décrire précisément la distribution et l'ordonnancement des opérations de communications inter-processeurs qui sont souvent critiques pour les performances temps réel.

Notre modèle d'*architecture multicomposant* hétérogène [Gra00] est donc un graphe orienté, dont chaque sommet est une machine à états finie [Gec86] et chaque arc une connexion entre deux sommets. Il y a cinq types de sommets : l'*opérateur* pour séquencer des opérations de calcul (séquenceur d'instructions), le *communicateur* pour séquencer des *opérations de communication* (canal DMA), le *bus/mux/démux* avec ou sans *arbitre* pour sélectionner, diffuser et éventuellement arbitrer des données, la *mémoire* pour stocker des données et des programmes. Il y a deux types de sommets mémoire : la mémoire RAM à accès aléatoire pour stocker les données ou programmes locaux à un opérateur, la RAM et la SAM à accès séquentiel, toutes deux pour les données communiquées entre opérateurs ou/et communicateurs. L'arbitre, quand il y en a un dans un bus/mux/démux/arbitre, est aussi une machine à états finie qui décide de l'accès aux ressources partagées que sont les mémoires. Les différents sommets ne peuvent pas être connectés entre eux de n'importe quelle manière, il est nécessaire de respecter un ensemble de règles. Par exemple deux opérateurs ne peuvent pas être connectés directement ensemble. Ils peuvent chacun être connecté à une RAM partagée ou à une SAM pour communiquer, en passant ou non par l'intermédiaire de communicateurs pour assurer le découplage entre calcul et communication. L'hétérogénéité ne signifie pas seulement que les sommets peuvent avoir chacun des caractéristiques différentes (par exemple durée d'exécution des opérations et

---

[Zom96] A. ZOMAYA, *Parallel and distributed computing handbook*, McGraw-Hill, 1996.

[Gra00] T. GRANDPIERRE, *Modélisation d'architectures parallèles hétérogènes pour la génération automatique d'exécutifs distribués temps réel optimisés.*, thèse de doctorat, Université de Paris Sud, Spécialité électronique, 30/11/2000.

[Gec86] F. GECSEG, *Products of automata*, *EATCS Monographs on Theoretical Computer Science*, Springer-Verlag, 1986.

taille mémoire des données communiquées), mais aussi que certaines opérations ne peuvent être exécutées que par certains opérateurs, ce qui permet de décrire aussi bien des composants programmables (processeurs) que des composants spécialisés (ASIC ou FPGA) [DLAS98]. Un processeur est décrit par un sous-graphe contenant un seul opérateur, une ou plusieurs RAM de données et de programme locaux. Un moyen de communication direct (sans routage) entre deux processeurs, est un sous-graphe contenant au moins une RAM (données communiquées) et des bus/mux/démux/arbitre, ou bien un sous-graphe linéaire composé au minimum des sommets (bus/mux/démux/arbitre, RAM, communicateur, RAM ou SAM, communicateur, RAM, bus/mux/démux/arbitre).

Notre modèle d'architecture de circuit intégré spécifique est le modèle classique RTL (« Register Transfer Level », niveau transfert de registres) [MC80]. C'est un graphe orienté où chaque sommet est un circuit combinatoire ou une mémoire, et chaque arc est un transfert de données.

Afin d'unifier le modèle multicomposant et le modèle de circuit intégré nous avons étendu le modèle RTL que nous qualifions alors de *Macro-RTL*. Une opération du graphe de l'algorithme correspond alors à une *macro-instruction* (une séquence d'instructions pouvant se réduire à une seule instruction dans le cas d'un composant non programmable, ou bien un circuit combinatoire); une dépendance de données correspond à un *macro-registre* (des cellules mémoire contiguës ou des conducteurs interconnectant des circuits combinatoires). Ce modèle encapsule les détails liés au jeu d'instructions, aux micro-programmes, au pipe-line, au cache, et lisse ainsi ces caractéristiques de l'architecture, qui seraient sans cela trop délicates à prendre en compte lors de l'optimisation. Il présente une complexité réduite adaptée aux algorithmes d'optimisation rapides tout en permettant des résultats d'optimisation relativement (mais suffisamment) précis.

#### 3.4.4 Modèle d'implantation

L'*implantation* d'un algorithme sur une architecture multicomposant est une *distribution* et un *ordonnement* non seulement des opérations de l'algorithme sur les opérateurs de l'architecture, mais aussi des opérations de communication, qui découlent de la première distribution, sur les communicateurs, les bus/mux/démux/arbitre et les mémoires.

La distribution consiste à affecter chaque opération de l'algorithme à un opérateur capable de l'exécuter (ce qui conduit à une partition du graphe de l'algorithme). Ensuite pour chacune de ces opérations il faut ajouter un sommet *alloc* d'allocation mémoire programme locale (resp. allocation mémoire données locales) et affecter ce sommet à une RAM programme (resp. RAM données locales) connectée à l'opérateur qui exécute l'opération. Enfin, pour chaque dépendance de données inter-opérateur (c'est-à-dire entre opérations affectées à des opérateurs différents), il faut choisir une *route* entre les deux opérateurs (chemin dans le graphe de l'architecture), créer et insérer, entre les deux opérations de l'algorithme, autant d'opérations de communication qu'il y a de communicateurs, autant de sommets *identité* qu'il y a de sommets bus/mux/démux/arbitre et autant de sommets *alloc* d'allocation de mémoires données

---

[DLAS98] A. DIAS, C. LAVARENNE, M. AKIL, Y. SOREL, « Optimized Implementation of Real-Time Image Processing Algorithms on Field Programmable Gate Arrays », in : *Fourth International Conference on Signal Processing*, Beijing, China, octobre 1998.

[MC80] C. MEAD, L. CONWAY, *Introduction to VLSI systems*, Addison-Wesley, 1980.

communiquées, qu'il y a de sommets mémoire SAM et RAM sur la route, puis les affecter aux sommets correspondant du graphe de l'architecture. Les sommets alloc permettent de déterminer la taille des mémoires nécessaires pour l'application. L'ordonnancement consiste à linéariser (rendre total) l'ordre partiel de chaque sous-graphe de l'algorithme qui a été affecté à chaque sommet du graphe de l'architecture. Cela conduit à ajouter des arcs de précedence d'exécution entre les opérations qui ne sont pas en dépendance de données.

Une implantation est donc le résultat d'une transformation du graphe de l'algorithme (ajout de nouveaux sommets et de nouveaux arcs) en fonction du graphe de l'architecture, lui même transformé (détermination de toutes les routes possibles). L'ensemble de toutes les implantations possibles, étant donné un algorithme et une architecture, est formalisé comme une composition de trois relations binaires : le routage, la distribution et l'ordonnancement, chacune d'elles mettant en correspondance deux couples de graphes (algorithme, architecture) [VS98]. On peut aussi la voir comme une loi de composition externe où un graphe d'algorithme est composé avec (influencé par) un graphe d'architecture pour donner comme résultat un graphe d'algorithme transformé (distribution et ordonnancement). Chacune de ces implantations possibles a des performances (latence, cadence) différentes. Ces performances sont obtenues par calcul de chemins critiques (pour les latences) et/ou de boucles critiques (pour les cadences) sur le graphe de l'implantation étiqueté par les durées d'exécution caractéristiques des opérateurs, des communicateurs, des bus/mux/démux/arbitre et des mémoires de l'architecture.

L'*implantation* d'un algorithme sur une architecture de circuit intégré spécifique est une transformation des opérations de l'algorithme en circuits combinatoires formant le *chemin de données* du circuit, et une transformation des dépendances de conditionnements et des sommets de factorisation en circuits combinatoires et mémoires réalisant des circuits séquentiels formant le *chemin de contrôle* du circuit. Les sommets de factorisation spécifient une répétition spatiale de sous-graphes. Chaque répétition spatiale peut être transformée partiellement ou totalement en répétition temporelle si nécessaire. Les dépendances de données sont transformées en transferts de données entre circuits. Contrairement à l'implantation sur un multicomposant le graphe de l'algorithme n'est pas influencé par un graphe d'architecture, en effet celle-ci n'est pas donnée a priori, mais il s'agit plutôt de la déterminer.

### 3.4.5 Implantation optimisée : adéquation

La recherche d'une implantation optimisée d'un algorithme sur une architecture multicomposant tenant compte de contraintes temps-réel et d'embarquabilité, correspond à une adéquation (mise en correspondance efficace) entre cet algorithme et cette architecture. C'est en général un problème d'optimisation complexe, car pour aboutir à une implantation optimisée à partir d'une spécification d'algorithme initiale, il faut en général lui appliquer des transformations plus profondes que celles présentées plus haut (par exemple changement de granularité, reformulation complète ...), de même il faut appliquer des transformations (changement du nombre et/ou des caractéristiques des composants) à l'architecture.

Le problème d'optimisation qui fait l'objet de nos recherches est celui de la minimisation de ressources matérielles sous contraintes temps réel et technologiques. L'algorithme, les compo-

---

[VS98] A. VICARD, Y. SOREL, « Formalization and Static Optimization for parallel implementations », in : *DAPSYS'98 Workshop on Distributed and Parallel Systems*, september 1998.

sants de l'architecture, et les contraintes temps réel, d'embarquabilité et de coût, sont supposés avoir été déterminés au préalable. L'optimisation se fait « hors-ligne », c'est à dire avant l'exécution en temps réel de l'application ; on précalcule une distribution et un ordonnancement. Cette approche est bien adaptée au contexte des applications temps réel qui doivent être déterministes afin d'assurer une bonne sécurité, de plus elle conduit à un exécutif induisant un surcoût inférieur à celui obtenu par des optimisations faites « en-ligne », c'est à dire pendant l'exécution en temps réel de l'application.

Le problème d'optimisation que nous avons formalisé [LS93,Sor94], et dont nous avons automatisé la résolution approchée, se limite au cas de l'adéquation entre un algorithme et une architecture donnés, y compris dans leur granularité et leur topologie, sous une contrainte temps réel unique de cadence égale à la latence et sans préemption d'une opération par une autre opération. Même ainsi réduit, ce problème est reconnu NP-difficile, et le nombre d'implantations possibles dans le cas d'une application réaliste rend prohibitive toute tentative de recherche exhaustive de la solution optimale, c'est pourquoi on utilise des heuristiques pour trouver des solutions approchées. De plus, l'objectif de prototypage rapide nous a fait étudier plus particulièrement des heuristiques « gloutonnes » (sans retour arrière) qui s'exécutent très rapidement [LC93].

Les heuristiques de distribution-ordonnancement que nous développons sont du type « gloutonnes » et de « list-scheduling » (choix fait par les fonctions de coût à partir des opérations ordonnancables), améliorées pour prendre en compte les communications inter-opérateurs qui peuvent avoir lieu par mémoire partagée ou par passage de messages (avec leur distribution et leur ordonnancement sur les routes, en tenant compte avec précision des routes parallèles et des conflits d'accès aux ressources partagées principalement les séquenceurs), l'hétérogénéité des opérateurs, des communicateurs, des bus/mux/démux/arbitre et des mémoires, et enfin le conditionnement des opérations. L'optimisation de l'utilisation des différents types de mémoire (RAM programme ou données et SAM) est réalisée par ré-allocation statique. En ce qui concerne la hiérarchie et la répétition finie de sous-graphe de l'algorithme, nous la traitons en effectuant de la défactorisation partielle sur nos graphes factorisés (transformation spatiale/temporelle). Pour cela, nous nous basons sur les travaux effectués sur la parallélisation de nids de boucles dans le cas des langages impératifs. Enfin, ces heuristiques sont ensuite étendues à des heuristiques itératives de voisinage local, beaucoup plus lentes mais donnant des résultats plus précis. Cela consiste à mémoriser les endroits où l'heuristique gloutonne se trouve en face de choix équivalents, puis à revenir sur ces choix en explorant toutes les possibilités plutôt que d'en choisir une au hasard et de continuer.

- 
- [LS93] C. LAVARENNE, Y. SOREL, « Performance Optimization of Multiprocessor Real-Time Applications by Graph Transformations », *in: Proc. of Parallel Computing 93 Conference*, Grenoble, September 1993.
- [Sor94] Y. SOREL, « Massively Parallel Systems with Real Time Constraints: the "Algorithm Architecture Adequation" methodology », *in: Proc. of the Conf. on "Massively Parallel Computing Systems, the Challenges of General-Purpose and Special-Purpose Computing Conference"*, Ischia Italy, May 1994. overall overview of AAA methodology with focus on Macro-RTL architecture model and on implementation model.
- [LC93] Z. LIU, C. CORROYER, « Effectiveness of heuristics and simulated annealing for the scheduling of concurrent task. An empirical comparison », *in: PARLE'93, 5th international PARLE conference, June 14-17*, p. 452-463, Munich, Germany, novembre 1993.

La recherche d'une implantation optimisée d'un algorithme sur une architecture de circuit intégré spécifique tenant compte de contraintes temps-réel et d'embarquabilité, est aussi un problème complexe qui est en général NP-difficile. Elle consiste à appliquer des transformations telles que celles décrites plus haut en évaluant, à chaque transformation à l'aide d'une fonction de coût, si les contraintes temps réel et d'embarquabilité sont respectées. Plus concrètement la fonction de coût calcule la latence du circuit et sa surface relativement à une caractérisation en termes de durée et de surface des éléments de bibliothèque VHDL synthétisables selon la technologie du circuit intégré visée. Les heuristiques que nous développons sont aussi « glou-tonnes » afin d'obtenir des résultats approchés le plus rapidement possible. Nous développons aussi des heuristiques de type « recuit simulé » beaucoup plus lentes basées sur le même type de fonction de coût.

### 3.4.6 Génération d'exécutifs et de « net-lists »

Un *exécutif* pour processeur [GLS98], comme une « net-list » pour circuit, correspond au codage d'une implantation particulière d'un algorithme suivant le modèle macro-RTL de l'architecture. La séquence d'opérations sur chaque opérateur ou chaque communicateur d'une architecture multicomposant est codée par une séquence de macro-instructions. Sur un circuit intégré les macro-instructions sont des composants de bibliothèque VHDL, connectés en pipeline. Le générateur d'exécutifs du logiciel SynDEx transforme donc le graphe flot de données de l'implantation en graphe flot de contrôle, codé par un exécutif et des « net-lists » en VHDL structurel.

La génération automatique d'exécutifs se fait suivant des règles décrivant la transformation d'un graphe d'implantation optimisé en un graphe d'exécution. Pour chaque opérateur (resp. chaque communicateur) on construit un programme séquentiel formé de la séquence des opérations de calcul (resp. des opérations de communication) qu'il doit exécuter. Les opérations de communications sont des SEND et des RECEIVE de données transmises entre communicateurs via une SAM, ou des WRITE et des READ quand les données sont transmises via des RAM. Pour garantir les précédences d'exécution entre les opérations appartenant à des séquences de calcul et/ou de communication différentes, et pour garantir l'accès en exclusion mutuelle aux données partagées par les opérations de ces séquences, on ajoute des opérations de synchronisation avant et après chaque opération qui lit (resp. écrit) une donnée écrite (resp. lue) par une opération appartenant à une autre séquence. Ces opérations de synchronisation utilisent des sémaphores générés automatiquement. Il a été montré à l'aide des réseaux de Pétri que ces sémaphores permettent à l'exécutif de respecter l'ordre partiel du graphe d'algorithme initial, n'introduisant ainsi pas de dead-lock dans une itération infinie ou finie donnée ou entre deux itérations infinies ou finies consécutives.

Un exécutif est généré dans plusieurs fichiers source, un pour chaque mémoire programme (qui peut être partagée entre plusieurs opérateurs). Chaque fichier est un code intermédiaire composé d'une liste d'appels de macros qui seront traduites par un macro-processeur dans le langage source préféré pour chaque opérateur. Les macros peuvent être classées en deux

---

[GLS98] T. GRANDPIERRE, C. LAVARENNE, Y. SOREL, « Modèle d'exécutif distribué temps réel pour SynDEx », *Rapport de Recherche n° 3476*, INRIA, august 1998, <http://www.inria.fr/rrrt/rr-3476.html>.

ensembles. Le premier ensemble est un jeu extensible de macro-instructions spécifiques à l'application, réalisant les opérations de l'algorithme. Le second ensemble, que nous appelons *noyau générique d'exécutif*, est un jeu fixe de *macros système* qui supportent le chargement initial des mémoires programmes, la gestion mémoire (allocation statique, copies et fenêtres glissantes de macro-registres), le séquençement (sauts conditionnels et itération), les transferts de données inter-opérateurs (macro-opérations de communication transférant le contenu de macro-registres), les synchronisations inter-séquences (assurant l'alternance entre écriture et lectures de chaque macro-registre partagé entre séquence de calcul et séquences de communication), et le chronométrage (pour permettre la mesure des caractéristiques des opérations de l'algorithme et des performances de l'implantation).

### 3.4.7 Tolérance aux pannes

Dans les applications qui nous concernent si les contraintes temps réel ne sont pas respectées l'environnement ne peut plus être contrôlé, cela peut avoir des conséquences catastrophiques telles que la destruction du système de commande lui-même, pouvant conduire dans certains cas jusqu'à la perte de vies humaines. L'objet de la *sécurité de fonctionnement* est d'éviter au maximum ces problèmes. Elle se décline selon deux aspects, d'une part la sécurité de conception du système de commande lui-même à l'aide de techniques de vérifications formelles (model-checking, theorem proving), et d'autre part la tolérance aux pannes. Le premier est traité pour nous par les compilateurs des langages synchrones qui produisent une spécification d'algorithme vérifiée. Nous traitons le second d'une part en demandant à l'utilisateur de spécifier les pannes matérielles qu'il souhaite tolérer par redondance au niveau de l'architecture (processeurs, capteurs, actionneurs, réseau), et d'autre part en déduisant de cette redondance matérielle la redondance logicielle nécessaire au niveau de l'algorithme et au niveau de l'exécutif, afin de garantir que si des pannes surviennent malgré tout lors du fonctionnement temps réel, le comportement de l'application reste correct jusqu'à ce que toute la redondance matérielle soit exploitée. Au delà de cette limite un fonctionnement dégradé, qui doit être impérativement spécifié dans l'algorithme, sera nécessaire. Concernant la tolérance aux pannes, le problème de l'identification des pannes elles-mêmes reste très difficile à traiter. Les heuristiques vues plus haut sont étendues pour prendre en compte la tolérance aux pannes.

## 4 Domaines d'applications

### 4.1 Panorama

**Résumé :** *Les domaines de l'AUTOMOBILE et de la SANTÉ, dans lesquels nous avons choisi de contribuer, posent de nombreux problèmes de modélisation, commande et informatique temps réel. Ces derniers nous conduisent à une activité sur les SYSTÈMES EMBARQUÉS pour la commande et le traitement du signal et des images.*

*Nous approfondissons les thèmes suivants :*

*Dans le domaine Automobile, en coopération avec Renault : la dépollution des moteurs thermiques (essence et diesel), la sécurité active (problèmes liés à l'adhé-*



rence).

*Dans le domaine de la Santé, en coopération avec l'Assistance Publique et l'Inserm : les systèmes de pré-traitement temps réel de signaux polygraphiques pour la recherche médicale, les applications cliniques.*

*Dans le domaine des Systèmes embarqués, en coopération avec des acteurs industriels des secteurs de l'Automobile et des Télécommunications, des problèmes de co-design de systèmes complexes de commande ou traitement du signal et des images, concernant en particulier les futurs systèmes embarqués de contrôle distribué pour automobiles (problèmes de programmation de tâches de commande sur un réseau de micro-contrôleurs).*

## 4.2 Automatique, Informatique et Automobile

**Mots clés :** ingénierie, environnement, transport, automobile, contrôle, commande, traitement du signal, temps réel, embarqué, moteurs thermiques, systèmes de dépollution, frottements, suspensions, essence, diesel, pile à combustible.

**Résumé :** *Ce domaine couvre ici, d'une part, la modélisation, l'identification, la surveillance/diagnostic et la commande d'organes isolés ou de groupes d'organes ; d'autre part l'informatique temps réel embarquée à bord des véhicules. Plusieurs projets Inria sont concernés, dans le cadre de la coopération avec Renault qui donne lieu à un accord-cadre (projets Meta2 puis Metalau, Pampa, Promath puis Mocoa, Sigma2, Sosso). Nous participons aussi, dans un cadre « Post Praxitele », aux travaux sur le Cycab (véhicule électrique) dans le cadre de LaRA (La Route Automatique). On ne décrit ici que les grandes lignes de la coopération avec Renault.*

### 4.2.1 Les thèmes de l'accord Inria-Renault en électronique embarquée dans l'automobile

Le domaine de l'accord-cadre Inria-Renault signé en janvier 96 pour une durée de quatre ans, et en cours de renouvellement, est l'*électronique embarquée*, ce qui signifie ici Automatique et informatique temps-réel.

Les thèmes de l'accord sont :

Thème 1 : pilotage et surveillance/diagnostic d'organes isolés

Thème 2 : gestion globale des organes

Thème 3 : pilotage automatique du véhicule, confort/ergonomie

Thème 4 : multiplexage, réseaux temps réel, logiciels pour la conception de systèmes temps réel.

Les activités de recherche concernées peuvent être classées par *Axes de recherche* et *Fonctions/technologie*. Nous indiquons le classement actuel des thèmes concernant potentiellement les projets Inria (en faisant apparaître en gras les domaines dans lesquels ils sont actifs aujourd'hui).

*Classement par axes de recherche :*

**pollution, consommation, sécurité, prestation valorisable par le client, qualité-coût-**

délat (QCD), **systèmes de transport**.

*Classement par fonctions-technologie :*

**moteur, boîte de vitesse, groupe moto-propulseur** (moteur + boîte); **freinage**; **direction**; **contrôle longitudinal**; interfaces homme-machine; **aide à la conduite**; air bag, éclairage, essuyage; navigation et communication; confort (climatisation, sièges ...); antivol; véhicule électrique ou hybride.

**automatique, traitement du signal**; détection de l'environnement; **multiplexage, architecture électronique**; **logiciel**; micro-électronique, **capteurs**, métrologie; **actionneurs**; gestion électrique; CEM.

#### 4.2.2 Les sujets de recherche

Les principaux problèmes, dans le cadre de cette coopération, sont probablement :

1. La réduction de la pollution et de la consommation des moteurs thermiques imposée par les futures normes. Les espoirs d'amélioration sont importants, ce qui fait que ce type de moteurs a sans doute encore de l'avenir, même si les solutions de substitution (moteurs électriques, à hydrogène ...) progressent. Ces espoirs viennent en général de progrès technologiques : nouveaux moteurs (injection directe essence ou diesel), nouveaux pots catalytiques pour mélanges pauvres, nouveaux capteurs de richesse des gaz ...

Pour l'automaticien, le problème consiste à proposer des algorithmes de commande ou surveillance/diagnostic tirant le meilleur parti de ces progrès technologiques. La modélisation est une étape importante, aucun modèle pour la commande n'étant disponible en général pour un nouvel organe. Elle se fait en collaboration avec les chimistes et motoristes. L'automatisation des organes isolés pose bien sûr des problèmes intéressants scientifiquement et industriellement, mais un aspect nouveau est l'approche système, rendue nécessaire pour aborder ces problèmes globaux que sont la gestion de l'énergie, la maîtrise de la pollution, la sécurité.

2. La maîtrise de la complexité de l'« électronique embarquée », qui est en fait de plus en plus de l'informatique distribuée embarquée. C'est une étape obligée pour envisager des fonctions sophistiquées comme la commande simultanée d'organes en vue de prestations de sécurité ou d'aide à la conduite (anti-collision, AICC ...). Remarquons que l'origine de cette complexité est l'approche contrôle-commande de systèmes déjà mentionnée. Un enjeu important est la réalisation de logiciels temps réel vérifiables et fiables.

#### 4.3 Automatique, Traitement du signal et Sciences biomédicales

**Résumé :** *L'étude des signaux physiologiques fait appel aux méthodes générales de traitement du signal. L'étude des régulations biologiques, de leurs dysfonctionnements et de leurs traitements peut tirer profit des méthodes de l'automatique : modélisation, identification, commande. L'utilisation conjointe de techniques de traitement du signal et d'automatique permet d'étudier le système cardio-respiratoire et sa régulation par le système nerveux autonome. Ces études conduisent à des outils pour les applications à la clinique.*

### 4.3.1 Analyse et modélisation du système cardio-respiratoire et de ses mécanismes de régulation

**Participants :** Claire Médigue, Alessandro Monti, Michel Sorine.

**Mots clés :** santé, systèmes physiologiques, diagnostic, système cardio-respiratoire, système nerveux autonome, mécanique cardiaque, analyse de signaux.

**Régulation des systèmes cardio-vasculaire (SCV) et respiratoire (SR).** Le SCV, coeur et vaisseaux, et le SR ont pour mission d'alimenter les tissus en oxygène et de les débarrasser du gaz carbonique. Pour le SCV, débit cardiaque et volume sanguin systémique sont les grandeurs régulées, ils dépendent de la pression artérielle. Dans la boucle de régulation à court terme de la pression artérielle ou arc baroréflexe, le système nerveux autonome (SNA) est le contrôleur, le barorécepteur artériel le capteur principal, et le coeur, l'actionneur principal. Le SNA permet l'adaptation du SCV aux variations rapides de la pression artérielle (exercice physique, passage à l'orthostatisme, mouvements respiratoires) et du volume sanguin systémique.

Les messages nerveux codés en fréquence en provenance des barorécepteurs sont transmis aux centres nerveux autonomes, d'où partent en retour vers le SCV les voies parasympathique, cardiomodératrice, (à destination du pacemaker naturel du nœud sinoatrial) et sympathique, cardioaccélétratrice (à destination du nœud sinoatrial, du ventricule, et des résistances vasculaires systémiques). Leur effet à court terme est une variation de la pression artérielle, par modification des cibles suivantes :

- la fréquence cardiaque, fréquence du pacemaker (effets chronotropes positif du sympathique et négatif du parasympathique) ;
- la contractilité, vitesse maximale de raccourcissement des fibres myocardiques (effet inotrope positif sympathique) ;
- les résistances systémiques à l'écoulement du sang dans les artères, les veines, et les capillaires artérioveineux systémiques, résistances dépendant directement du calibre de ces vaisseaux (vasoconstriction sympathique).

Pour le SR, les flux d'oxygène et de gaz carbonique sont les grandeurs réglées du système, ils dépendent de la fréquence et du volume respiratoires. Dans la boucle de régulation de la pression partielle d'oxygène, le SNA est le contrôleur, les chémorécepteurs les capteurs principaux et les muscles respiratoires les actionneurs. Les centres respiratoires bulbaires modulent la profondeur et le point de rupture de la fin de l'inspiration, générant ainsi l'activité rythmique respiratoire, en fonction des informations transmises par les chémorécepteurs.

La respiration module le rythme cardiaque et la pression artérielle par action mécanique (pompage diaphragmatique à l'inspiration augmentant le débit veineux instantané vers le coeur droit) et par interaction directe entre les centres nerveux respiratoire et cardiovasculaire. La figure 4.3.1 représente la vision système des SCV et SR sous le contrôle du SNA.

**Traitement des signaux cardio-vasculaires et respiratoires.** Une première approche, descriptive, du SCV et de son contrôle par le SNA est fournie par l'analyse du rythme cardiaque, de la pression artérielle, de la respiration, et de leur adaptation à des conditions physiologiques (motilité, sommeil, orthostatisme ...) ou pathologiques (insuffisance cardiaque, syncopes ...) ou

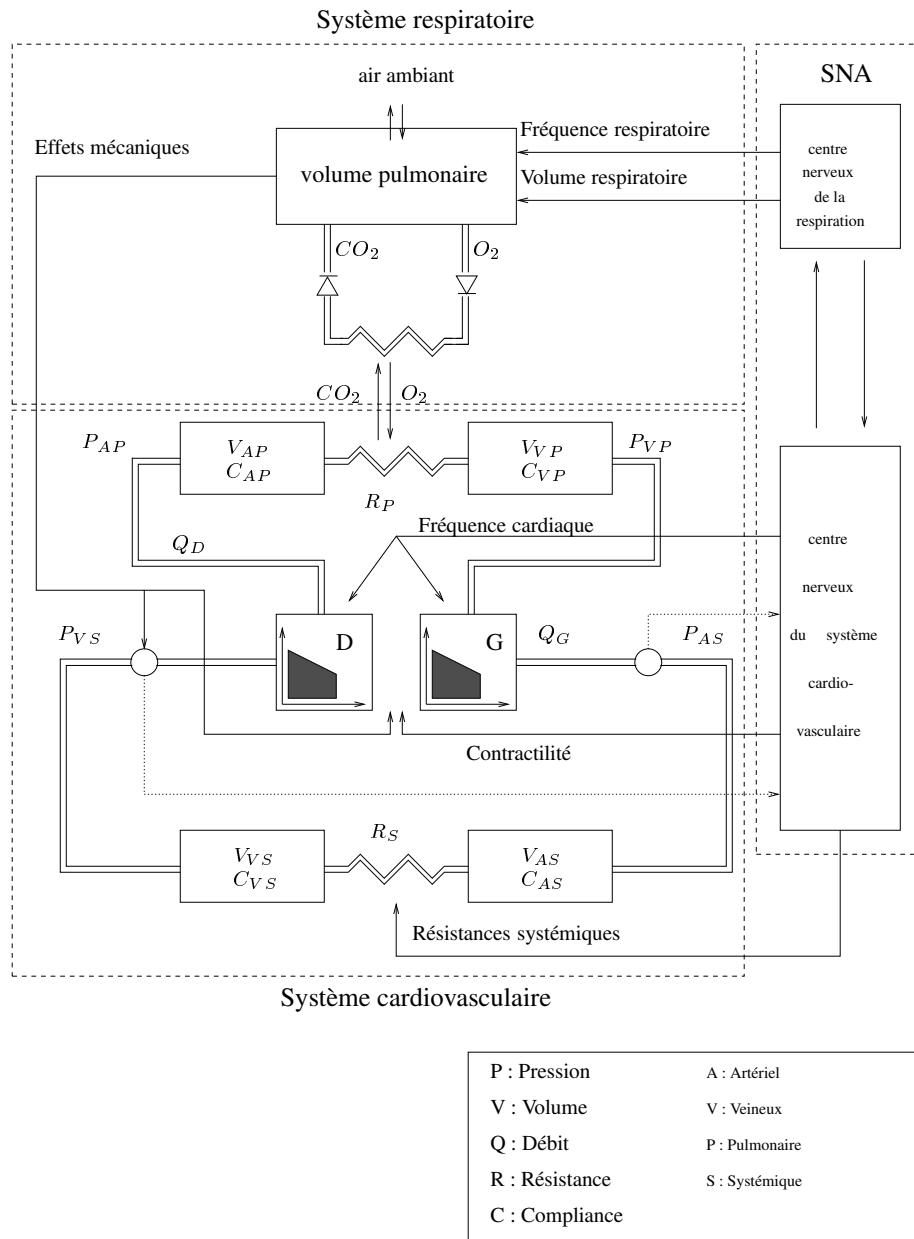


FIG. 4 – Modèle du système cardio-respiratoire.

encore pharmacologiques (bloquant ou activateur d'une des branches du SNA). Le rythme cardiaque et la pression artérielle sont des fenêtres d'accès au contrôle par le SNA : leurs variabilités à court et moyen terme expriment l'influence de la respiration et l'activité des baroréflexes, contrôlés par le SNA. Ces variables observables, indicateurs de bon fonctionnement du système, sont accessibles par des méthodes de traitement du signal. Des méthodes de détection permettent d'extraire les événements d'intérêt sur les signaux bruts : battements cardiaques à partir de l'ECG, pour construire le rythme cardiaque ; maxima et minima de la pression artérielle pour construire les rythmes systoliques et diastoliques . . . Des méthodes d'analyse, en temps, en fréquence et en temps-fréquence, comme la transformation de pseudo Wigner-Ville lissée, de la démodulation complexe modifiée, sont ensuite appliquées à ces rythmes résultants pour étudier leurs variabilités. Les relations entre les rythmes sont évalués en amplitude, fréquence et phase ; des gains sont calculés pour chaque zone fréquentielle d'intérêt, comme la sensibilité du baroréflexe (cf. 6.3.3). Ces méthodes sont implémentées dans LARY\_CR (cf. 5.1) .

### 4.3.2 La fonction de reproduction vue sous l'angle de la commande

**Participants** : Frédérique Clément, Daniel Claude.

**Mots clés** : santé, systèmes physiologiques, fonction de reproduction, commande pharmacologique.

Le niveau d'approche de la modélisation de la fonction ovarienne, celui des cellules de la granulosa folliculaire, est en phase avec les études effectuées par l'équipe « Régulation de la folliculogénèse », au sein de l'unité de recherche de Physiologie de la Reproduction et des Comportements de l'INRA Tours, ainsi que par les services d'Endocrinologie de la Reproduction de l'Hôpital Necker (Paris) et du St Mary's Hospital (Londres).

Nous disposons d'un modèle mathématique rendant compte des processus cellulaires de prolifération, différenciation et apoptose (mort cellulaire) [CGM<sup>+</sup>97]. Les variables en jeu sont, d'une part, les effectifs des différentes catégories de cellules (variables d'état), et, d'autre part, les taux de transition entre les différents états cellulaires (taux de sortie du cycle cellulaire et taux d'entrée en apoptose). Ces taux sont des variables de contrôle qui traduisent la réponse des cellules folliculaires aux signaux qu'elles reçoivent de leur environnement hormonal, et en particulier de FSH et LH.

L'élaboration et les résultats de ce modèle ont fait émerger une notion nouvelle, celle de capital prolifératif folliculaire. Cette notion permet d'envisager une gestion optimisée de ce capital, à l'aide de thérapeutiques adéquates, à des fins zootechniques (superovulation) ou cliniques (traitement de l'infertilité anovulatoire). Elle permet aussi de proposer une hypothèse explicative pour les différences observées dans l'espèce ovine entre races mono- et poly-ovulantes quant à l'effectif cellulaire atteint au moment de l'ovulation. L'effectif plus faible en cas de poly-ovulation serait dû à un arrêt plus précoce de la prolifération cellulaire, lié à une sortie plus rapide du cycle cellulaire.

---

[CGM<sup>+</sup>97] F. CLÉMENT, M.-A. GRUET, P. MONGET, M. TERQUI, E. JOLIVET, D. MONNIAUX, « Growth kinetics of the granulosa cell population in ovarian follicles: an approach by mathematical modeling », *Cell Prolif.* 30, 1997, p. 255–270.

Cette hypothèse a motivé la mise en place d'une expérience de mesure comparative de la fraction de croissance (proportion de cellules proliférantes parmi l'ensemble des cellules folliculaires) à différents stades du développement folliculaire chez deux races de brebis [18]. Cette expérience a confirmé la cinétique différentielle de sortie du cycle en fonction du taux d'ovulation. L'importance de ce résultat doit être considéré sous l'angle de la physiopathologie comparée si l'on sait que dans le syndrome des ovaires polykystiques, cause majeure d'anovulation chez la femme, on constate un blocage des follicules à un stade intermédiaire, qui pourrait lui aussi résulter de perturbations de la prolifération folliculaire.

La réflexion engagée se poursuit et concerne actuellement la compréhension du mécanisme d'action des gonadotropines sur les cellules folliculaires. En particulier, le contrôle de la production d'une molécule clé pour la transduction du signal hypophysaire, l'AMPc, fait l'objet des études en cours, tant sur le plan expérimental que sur celui de la modélisation (cf. 6.3.6).

### 4.3.3 Commande chronopharmacologique en clinique : applications en bactériologie et en cancérologie

**Participants** : Jean Clairambault, Daniel Claude.

**Mots clés** : santé, systèmes physiologiques, commande pharmacologique.

Nous étudions dans les domaines de la bactériologie clinique et de la cancérologie, en liaison avec des cliniciens, des méthodes thérapeutiques relevant de la chronobiologie, visant à traiter différemment deux types de cellules, saines d'une part, cibles (bactéries pathogènes ou cellules cancéreuses) de l'autre, en modélisant l'action des drogues utilisées sur ces deux types de populations cellulaires, et en définissant des schémas d'administration à même d'améliorer leur efficacité thérapeutique et / ou leur tolérabilité par le patient (i.e. en maximisant leur toxicité sur les cellules cibles tout en minimisant leur toxicité sur les cellules saines). Cette action est menée en collaboration avec le Service Pharmaceutique de l'Hôpital Antoine-Charial (Hospices Civils de Lyon) et avec le Laboratoire « Chronothérapeutique des cancers » (INSERM EPI 0118, Hôpital Paul-Brousse, Villejuif).

## 4.4 Systèmes embarqués pour la commande et le traitement du signal et des images

**Participants** : Thierry Grandpierre, Rémy Kocik, Liliana Cucu, Yves Sorel.

**Résumé** : *La méthodologie AAA de développement de systèmes embarqués pour la commande et le traitement du signal et des images, répond à des problèmes communs aux domaines de l'Automobile et des Télécommunications.*

Le domaine de l'automobile, avec les systèmes de commande et de supervision d'organes à travers un réseau informatique, offre un bel exemple de codesign de système d'automatique embarqué. Le domaine des télécommunications avec l'avènement des SOC (System On a Chip) pose aussi des problèmes de codesign de systèmes complexes de traitement du signal et des images. La méthodologie AAA est utilisée dans le projet IMARA (post-Praxitèle) pour réaliser la commande d'un véhicule électrique semi-autonome comprenant un bus CAN reliant plusieurs

microcontrôleurs, dans le projet RNRT PROMPT pour programmer des multi-SOCs, dans le projet RNTL ACOTRIS pour programmer des applications de traitement d'images temps réel sur des architectures multi-DSP avec des circuits intégrés spécifiques, et enfin dans le projet national AEE (Architecture Electronique Embarquée) pour optimiser les applications distribuées temps réel de l'automobile.

## 5 Logiciels

### 5.1 LARY\_CR, logiciel d'analyse des rythmes cardio-respiratoires

**Participants** : Claire Médigue [correspondante], Alessandro Monti.

LARY\_CR est dédié à l'analyse des rythmes cardiovasculaires et respiratoires enregistrés simultanément : détection et mesure des événements physiologiques d'intérêt (RR sur l'ECG, systolique et diastolique sur la pression artérielle) puis analyse temporelle et fréquentielle des rythmes résultants. LARY\_CR propose des applications médicales ciblées et facilement modifiables sur la base de méthodes de traitement du signal en bibliothèque ; citons par exemple l'étude des interactions cardio-respiratoires dans l'épreuve physiologique du test de verticalisation chez des sujets contrôles ou insuffisants cardiaques. LARY\_CR est développé dans l'environnement de calcul scientifique SCILAB\_SCICOS, conçu à l'INRIA et diffusé comme logiciel libre.

### 5.2 SynDEx, logiciel d'aide à l'implantation d'applications temps réel embarquées

**Participant** : Yves Sorel [correspondant].

Le logiciel de CAO niveau système *SynDEx* supporte la méthodologie AAA, pour le prototypage rapide optimisé et le co-design d'applications temps réel embarquées. Il permet de spécifier l'algorithme d'application et l'architecture multicomposant, de faire une adéquation dont le résultat est une simulation temporelle de l'exécution de l'algorithme sur l'architecture. Le codage de l'implantation est généré automatiquement à partir de bibliothèques extensibles et portables, sous la forme d'un exécuteur pour chaque processeur (en assembleur ou en C ...).

SynDEx produit un exécuteur optimisé principalement statique pour des architectures multiprocesseur à base de stations de travail UNIX, de processeurs i80x86, de processeurs de traitement du signal TMS320C40, TMS320C60 et ADSP21060, de microcontrôleurs MPC555, MC68332 et i80C196. SynDEx est utilisé aussi bien par des universitaires que par des industriels (voir <http://www-rocq.inria.fr/syndx>).

#### Diffusion de SynDEx

La version 5.2, avec générateur d'exécuteur pour architectures cibles hétérogènes et noyau d'exécuteur pour réseau de stations de travail sous C-UNIX-TCP/IP, est téléchargeable gratuitement sur le Web à l'URL : <http://www-rocq.inria.fr/syndx>.

## 6 Résultats nouveaux

### 6.1 Propriétés indépendantes du retard des systèmes à retard et étude des systèmes à paramètres incertains

**Résumé :** *Les systèmes non-linéaires vérifiant des conditions du type de celles du critère de stabilité de Popov ont un comportement qualitatif proche de celui des systèmes linéaires – tout au moins pour ce qui concerne la stabilité asymptotique des systèmes stationnaires. Nous avons entrepris de généraliser cette remarque à l'étude d'autres propriétés asymptotiques. L'existence de cycles limites et leur stabilité sont en particulier abordées.*

**Participant :** Pierre-Alexandre Bliman.

**Mots clés :** stabilité, LMI, système de Lure, oscillation non linéaire, solution périodique, critère du cercle, critère de stabilité de Popov.

Nous avons montré l'an dernier pour le système

$$\dot{x} = A_0 x(t) + A_1 x(t - h) \quad (11)$$

un résultat de stabilité indépendante du retard (c'est-à-dire, stabilité pour toute valeur positive ou nulle de  $h$ ), dont nous rappelons le principe. L'étude de l'évolution le long des trajectoires de (11) des fonctionnelles définies pour tout entier  $k > 0$  par

$$\begin{pmatrix} x(t) \\ x(t-h) \\ \vdots \\ x(t-(k-1)h) \end{pmatrix}^T P_k \begin{pmatrix} x(t) \\ x(t-h) \\ \vdots \\ x(t-(k-1)h) \end{pmatrix} + \int_{t-h}^t \begin{pmatrix} x(\tau) \\ x(\tau-h) \\ \vdots \\ x(\tau-(k-1)h) \end{pmatrix}^T Q_k \begin{pmatrix} x(\tau) \\ x(\tau-h) \\ \vdots \\ x(\tau-(k-1)h) \end{pmatrix} d\tau \quad (12)$$

conduit à une famille d'inégalités linéaires matricielles (*linear matrix inequalities* en anglais, abrégées en *LMI*), indexées par  $k$  et dont les inconnues sont les matrices symétriques définies positives  $P_k, Q_k \in \mathbb{R}^{kn \times kn}$ . La solvabilité de l'un quelconque de ces problèmes assure que  $A_0 + zA_1$  est Hurwitz pour tout  $z$  complexe de norme inférieure ou égale à 1 – une propriété légèrement plus restrictive que la stabilité indépendante du retard, communément appelée stabilité *fortement* indépendante du retard. Réciproquement, si cette dernière propriété est vérifiée, alors une au moins de ces LMIs est soluble – et en fait elles le sont alors toutes à partir d'un certain rang  $k$ . Cette équivalence constitue l'originalité du résultat. Celui-ci fournit donc une caractérisation de la stabilité fortement indépendante du retard au moyen de LMIs, d'une manière analogue au résultat de caractérisation de la stabilité des systèmes linéaires de dimension finie par la solvabilité de l'équation de Lyapunov associée.

Cette année, la même approche a été appliquée à l'étude de la stabilité des équations fonctionnelles-différentielles de type neutre, ainsi qu'aux systèmes 2D. Une extension des mêmes idées dans une autre direction a permis d'obtenir une caractérisation LMI de versions indépendantes du retard du Théorème des petits gains (*small gain theorem* en anglais), du critère du cercle, du critère de Popov.



On a également éclairci la signification de la méthode : pour le problème de la stabilité indépendante du retard du système (11), résoudre le problème LMI déduit de l'utilisation de (12) revient en fait à chercher, pour l'inéquation de Lyapunov (dépendant du paramètre  $z$ )

$$(A_0 + zA_1)^*P(z) + P(z)(A_0 + zA_1) < 0,$$

une solution hermitienne définie positive  $P(z)$  qui soit *polynômiale* en les variables  $z, z^*$  pour  $|z| \leq 1$ , et de degré  $k - 1$ . Si  $A_0 + zA_1$  est Hurwitz pour  $|z| \leq 1$ , une telle solution existe pour  $k$  suffisamment grand, car l'inégalité admet des solutions *analytiques* en  $z, z^*$ . La matrice  $P_k$  de la fonctionnelle (12) est directement liée aux coefficients des termes de degré au plus  $k - 1$  de ce développement.

## 6.2 Modélisation et commande des systèmes à retards ou à hystérésis

**Résumé :** *Les systèmes que nous étudions sont constitués d'une partie linéaire à retard avec, en contre-réaction, une non-linéarité de type signe ou saturation. Nous recherchons des contrôleurs robustes pour les asservir ou les stabiliser. De tels systèmes peuvent être le siège d'oscillations qu'il s'agit de contrôler ou d'analyser pour des applications en identification. Cette année, nous avons, de plus, continué l'étude de retards fractionnaires.*

**Participants :** Marianne Akian, Pierre-Alexandre Bliman, Catherine Bonnet, Jonathan Partington, Michel Sorine.

**Mots clés :** commande robuste, retard, saturation, signe, système linéaire fractionnaire, facteurs de Bézout.

### 6.2.1 Commande de systèmes à retard avec sortie tout-ou-rien

**Participants :** Marianne Akian, Pierre-Alexandre Bliman.

Nous avons poursuivi cette année l'étude de la dynamique de systèmes simples à retard et relais, du type de  $\dot{x} + x = -\text{sgn}x(t - h)$ , représentant le comportement en boucle fermée de certains systèmes contrôlés par des capteurs ou actionneurs « rustiques », fournissant une information binaire et retardée. Pour le système précédent, l'étude complète avait été faite, et montrait l'existence d'une infinité dénombrable de cycles-limites, de période et d'amplitude s'accumulant en zéro, mais dont un seul cependant est stable ; c'est également le seul de ces cycles à avoir une période supérieure à deux fois le retard. Cet aspect constitue une limitation du comportement de ces systèmes, car une taille minimale est en pratique imposée à  $x$ , celle de l'amplitude du cycle stable, alors qu'on préférerait avoir la possibilité de la diminuer. L'utilisation de petits gains peut être envisagée, mais cette politique se heurte en pratique à la nécessité de prendre en compte les perturbations : le gain ne peut être diminué arbitrairement. Ainsi, il nous a semblé intéressant d'examiner dans quelles conditions des systèmes proches du précédent pouvaient posséder des solutions périodiques stables de période petite (typiquement, inférieure à deux fois le retard), et donc d'amplitude également petite.

L'étude complexe de la typologie de tous les cycles d'un système ayant une non-linéarité antisymétrique mais non monotone, montre que pour un tel système, tous les cycles rapides sont également instables.

## 6.2.2 Stabilisation robuste des systèmes exponentiels fractionnaires et/ou à retards

**Participants :** Catherine Bonnet, Youssef Fakhreddine, Habib Jreij, Jonathan Partington.

Nous avons poursuivi cette année l'étude des systèmes fractionnaires à retard dont la fonction de transfert est du type

$$P(s) = \frac{q_0(s) + \sum_{i=1}^{n_2} q_i(s)e^{-\beta_i s} + \sum_{i=1}^{\tilde{n}_2} \tilde{q}_i(s)e^{-v_i(s)}}{p_0(s) + \sum_{i=1}^{n_1} p_i(s)e^{-\gamma_i s} + \sum_{i=1}^{\tilde{n}_1} \tilde{p}_i(s)e^{-u_i(s)}}$$

où  $0 < \gamma_1 \cdots < \gamma_{n_1}$ ,  $0 < \beta_1 \cdots < \beta_{n_2}$ , les  $p_i$ ,  $q_i$ ,  $\tilde{p}_i$ ,  $\tilde{q}_i$  sont des polynômes de la forme  $\sum_{k=0}^{l_i} a_k s^{\alpha_k}$

avec  $\alpha_k \in \mathbf{R}^+$ , les  $u_i$ ,  $v_i$  sont des polynômes de la forme  $\sum_{k=1}^{m_i} b_k s^{\delta_k}$  avec  $0 < \delta_k \leq 1$  et  $b_k \geq 0$ .

Les  $u_i$  et  $v_i$  ne sont pas de la forme  $\alpha s$  c'est-à-dire ne sont pas des polynômes standards de degré un.

Il est également fait l'hypothèse que le numérateur et le dénominateur de  $P(s)$  n'ont pas de zéro commun dans  $\{\operatorname{Re} s \geq 0\} \setminus \{0\}$ .

Pour ces systèmes, nous avons obtenu la condition nécessaire et suffisante de BIBO-stabilité « pas de pôles dans  $\{\operatorname{Re} s \geq 0\}$  » dans le cas systèmes retardés (*ie* vérifiant  $\deg p_0 > \deg p_i$  pour  $i = 1, \dots, n_1$  et  $\deg p_0 > \deg q_i$  pour  $i = 0, \dots, n_2$ ) et la condition suffisante de stabilité « il existe  $a < 0$  tel que  $P$  n'ait pas de pôles dans  $(\mathbf{C} \setminus \mathbf{R}_-) \cap \{\operatorname{Re} s > a\} \cup \{0\}$  » dans le cas des systèmes neutres (*ie* vérifiant  $\deg p_0 \geq \deg p_i$  pour  $i = 1, \dots, n_1$  (avec égalité pour au moins un polynôme  $p_i$ ) et  $\deg p_0 > \deg q_i$  pour  $i = 0, \dots, n_2$ ).

Nous avons, par l'intermédiaire de contre-exemples, montré que dans le cas de systèmes neutres, la condition suffisante ci-dessus n'est pas nécessaire pour la BIBO-stabilité et que la condition « pas de pôles dans  $\{\operatorname{Re} s \geq 0\}$  » ne peut pas dans ce cas être suffisante pour la BIBO-stabilité.

Cette « famille » de contre-exemples nous a aussi permis d'exhiber un système dont le transfert est  $H_\infty$ -stable et continu sur l'axe imaginaire étendu et pourtant n'est pas BIBO-stable.

Cela constitue un exemple intéressant de différence entre ces deux classes puisque cet exemple possède une expression analytique simple, ce qui n'était pas le cas des exemples connus à ce jour.

Nous avons également progressé sur les conditions de nucléarité des systèmes fractionnaires à retard en fournissant des conditions nécessaires et suffisantes dans des cas particuliers.

Enfin, l'étude de l'approximation de systèmes fractionnaires par des systèmes diffusifs (voir [Mon98] et [Mat98] pour une présentation des réalisations diffusives) est en cours.

Dans le cadre du stage du Y. Fakhreddine, nous avons amorcé l'implémentation en scilab/scicos des contrôleurs de dimension infinie déterminés dans [9] pour la stabilisation robuste des systèmes à retards de type retardé. Nous avons considéré en premier lieu le cas des systèmes du premier ordre avec un seul retard (transfert du type  $\frac{e^{-Ts}}{as+b}$ ). Le cas des systèmes stables est résolu, celui des systèmes instables est encore en cours, il demande des précautions supplémentaires mais ne doit poser aucun problème.

### 6.3 Automatique, Traitement du signal et Sciences biomédicales.

**Participants :** Jean Clairambault, Daniel Claude, Frédérique Clément, Mayer Landau, Laurence Mangin, Claire Médigue, Alessandro Monti, Michel Sorine.

**Mots clés :** santé, systèmes physiologiques, diagnostic, pacemaker, Van-Capelle et Dürrer, onde de Mayer, système cardio-respiratoire, système nerveux autonome, SNA, mécanique du myocarde, rythme cardiaque, inhibition du SNA, stimulation du SNA, fonction de reproduction, commande pharmacologique, analyse de signaux.

**Résumé :** *L'étude des comportements globaux des systèmes cardio-vasculaire (SCV) et respiratoire (SR) sous le contrôle du SNA conduit à des études plus localisées de comportements particuliers. Les résultats, cette année, ont ainsi concerné les thèmes suivants :*

- *La modélisation en électrophysiologie cardiaque, au niveau cellulaire, avec l'étude du couplage cellule pacemaker-cellule non-pacemaker.*
- *L'étude de modélisation mécanique du myocarde : elle a pour principal objectif de mieux comprendre la nature du contrôle (en contraction ou relaxation) afin par exemple de mieux interpréter les mesures de pression artérielle et d'ECG, ou le rôle du SNA. Elle a conduit à un nouveau modèle de contraction musculaire et à ses premières utilisations.*
- *L'analyse descriptive du SCV et de son contrôle par le SNA. Cela donne lieu à plusieurs études cliniques : applications à la physiologie du sommeil, à l'insuffisance cardiaque, à la pharmacologie.*
- *Modélisation du centre de commande respiratoire.*

*Des méthodes d'automatique analogues sont appliquées dans un autre domaine : la modélisation et la commande de la fonction ovarienne.*

---

[Mon98] G. MONTSENY, « Diffusive representation of pseudo-differential time-operators », in: *Systèmes Différentiels Fractionnaires, Modèles, Méthodes et Applications*, 5, ESAIM proceedings, p. 159–175, 1998.

[Mat98] D. MATIGNON, « Stability properties for generalized fractional differential systems », in: *Systèmes Différentiels Fractionnaires, Modèles, Méthodes et Applications*, 5, ESAIM proceedings, p. 145–158, 1998.

### 6.3.1 Modélisation en électrophysiologie cardiaque

**Participant** : Mayer Landau.

Les travaux de l'an passé portaient sur l'étude dans un cadre unifié de deux pathologies électriques cardiaques majeures : les foyers ectopiques (FE) et les blocs unidirectionnels (BU). Ces études se sont poursuivies dans deux directions :

- L'étude de phénomènes de réentrée.

Il est largement accepté que les phénomènes dits de « réentrée » où l'onde de propagation du potentiel d'action cardiaque reboucle dans un réseau cellulaire, sont de premières importances dans la survenue d'arythmies cardiaques à haut risque dues à l'ischémie. Les blocs unidirectionnels étant un élément constitutif de ces réentrées, les travaux précédents se prolongent par l'obtention des différents types de réentrée associées à l'introduction des BU décrits précédemment dans des anneaux cellulaires. On obtient ainsi une première classification et explication de ces phénomènes mal compris. En particulier dans le cas d'un BU avec accrochage sur un foyer ectopique dans le sens de propagation de l'onde d'activation, la restimulation du foyer par l'onde de réentrée conduit à des phénomènes de chaos associés à la fibrillation cardiaque.

- Etude de phénomènes de FE et BU avec le modèle de Luo-Rudy.

Les résultats obtenus sur les FE et les BU, l'étaient à l'aide du modèle mathématique de Van Capelle et Durrer de génération du potentiel d'action électrique cardiaque. Ce modèle globalise à la fois les flux ioniques à travers la membrane cellulaire et les perméabilités membranaires associées.

D'autre part, l'ischémie cardiaque a été décrite dans ces travaux par l'adjonction d'un courant de lésion (« injury current ») au deuxième membre de l'équation en potentiel. Il existe en fait d'autres types d'ischémie en particulier l'hyperkaliémie ou l'acidose cardiaque. Le modèle, plus physiologique de Luo-Rudy, car détaillant les divers courants ioniques et perméabilités membranaires associées, a été utilisé dans le cadre de l'hyperkaliémie. On obtient ainsi les comportements de FE et de BU simulés avec le modèle de Van Capelle et Durrer, mais avec la possibilité de compréhension plus approfondie des causes ioniques sous jacentes.

Ces études sont menées en collaboration avec A. Bardou de l'Inserm qui envisage une approche expérimentale destinée à confirmer ces résultats théoriques.

### 6.3.2 Modélisation mécanique du myocarde.

**Participants** : Frédérique Clément, Michel Sorine.

La prise en compte du mouvement d'ensemble des nanomoteurs moléculaires a conduit à modifier en la généralisant la loi de comportement de la fibre cardiaque que nous avons précédemment proposée [Bes00,BS00].

---

[Bes00] J. BESTEL, *Modèle différentiel de la contraction musculaire contrôlée. Application au système cardio-vasculaire*, thèse de doctorat, Université de Paris-Dauphine, Spécialité mathématiques appliquées, 22/12/2000.

[BS00] J. BESTEL, M. SORINE, « A differential model of muscle contraction and applications », *in* :

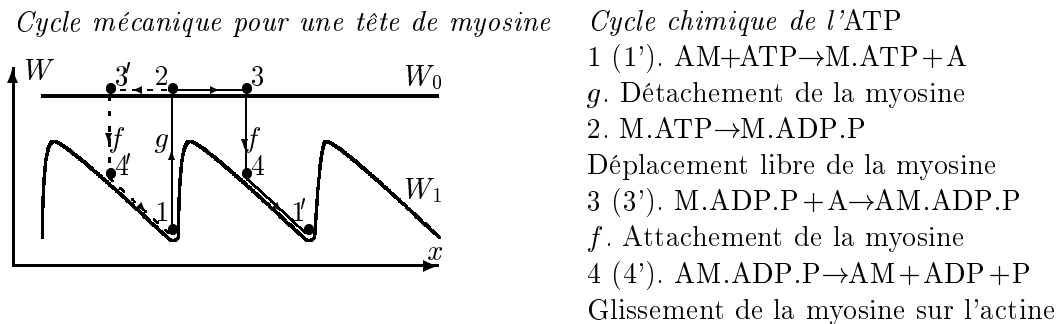
Le fonctionnement du nanomoteur chimique d'acto-myosine peut être décrit par une équation de Langevin : un potentiel d'interaction  $W$  (mécanique et chimique, cf figure ci-dessous) asymétrique et périodique entre les deux types de filaments permet d'expliquer l'apparition d'un mouvement moyen non nul, sous l'effet de l'agitation thermique. L'évolution de la probabilité de l'état mécanique de chacune des liaisons est décrite par une équation de Fokker-Planck<sup>[JAP97]</sup>. A cette échelle, la commande correspond à la fixation d'un ion  $Ca^{++}$  sur la troponine.

A l'échelle du sarcomère, nous avons pu montrer que le comportement d'une collection de nanomoteurs était équivalent à celui d'un unique moteur et l'interpréter dans le cadre du modèle original du filament glissant de Huxley<sup>[Hux57]</sup>. A ce niveau la commande représente la concentration intracellulaire en calcium [ $Ca^{++}$ ].

A l'échelle de la myofibre, la loi de comportement devient finalement, après sommation des comportements des sarcomères en parallèle :

$$\begin{cases} \dot{k}_c &= -(|u| + |\dot{\epsilon}|) k_c + k_0 |u|_+ \\ \dot{\sigma}_c &= -(|u| + |\dot{\epsilon}|) \sigma_c + k_c \dot{\epsilon} + \sigma_0 |u|_+ \\ \sigma &= k_c \xi_0 + \sigma_c + \eta \dot{\epsilon} \end{cases} \quad (13)$$

A ce niveau, la commande  $u$  représente une entrée de nature électro-chimique : le potentiel d'action ( $u > 0$  : contraction,  $u < 0$  : relaxation active,  $u = 0$  : relaxation passive). Ce système algébro-différentiel, de type visco-élasto-plastique, décrit la relation entre contrainte  $\sigma$  et déformation  $\epsilon$ . Il rend compte de propriétés qualitatives clés : raccourcissement à partir du repos en réponse à la commande, nature du comportement des éléments passifs, caractéristiques de la contraction isotonique comparable au modèle expérimental de Hill.



Couplage entre cycle mécanique à 2 états de la myosine et cycle chimique à 4 états de l'ATP

### 6.3.3 Analyse descriptive du scv et de son contrôle par le SNA

**Participants :** Claire Médigue, Alessandro Monti, Michel Sorine.

---

*Schloessmann Seminar on Mathematical Models in Biology, Chemistry and Physics, Max Plank Society, Bad Lausick, Germany, May 19-23 2000.*

[JAP97] F. JÜLICHER, A. AJDARI, J. PROST, « Modeling molecular motors », *Reviews of Modern Physics* 69, 4, October 1997.

[Hux57] A. F. HUXLEY, « Muscle structure and theories of contraction », *in: Progress in biophysics and biological chemistry*, 7, Pergamon Press, 1957.

**Sensibilité du baroréflexe :** Dans un modèle très simple, la fréquence instantanée  $\dot{\phi}$  (ou plus précisément l'inverse du signal  $RR$ ) est l'entrée du SCV et la pression artérielle  $P_a$  sa sortie. De façon symétrique, pour le SNA,  $P_a$  est l'entrée et  $\dot{\phi}$  la sortie. La relation  $P_a \rightarrow \dot{\phi}$  constitue un modèle de l'« arc baroréflexe ». L'analyse d'un modèle très simple de la boucle  $\dot{\phi} \rightarrow P_a \rightarrow \dot{\phi}$  avait montré <sup>[Ver96]</sup> qu'elle est le siège d'un cycle limite de basse fréquence (environ  $0.1Hz$  pour une fréquence cardiaque de  $1Hz$ ), connu, sans que son origine soit comprise, sous le nom d'« ondes de Mayer » ou basse fréquence (BF). Un calcul plus précis, utilisant une technique d'approximation d'oscillations non linéaires avait permis de calculer la fréquence de ce cycle et son amplitude dans  $\dot{\phi}$  aussi bien que dans  $P_a$ . Cela avait permis de proposer une méthode d'identification de la « sensibilité » de l'arc baroréflexe, c'est-à-dire du gain complexe de  $P_a \rightarrow \dot{\phi}$  à la fréquence de Mayer, à partir de mesures de l'ECG et de la pression artérielle. Le gain dans la zone d'énergie de haute fréquence (HF) liée à la respiration, est étudié également depuis cette année. Ces gains constituent des indicateurs possibles de l'état du SNA.

**Coordination des rythmes cardio-respiratoires.** Le système cardio-respiratoire peut être considéré comme un couplage, au niveau mécanique et nerveux, de deux oscillateurs physiologiques : le système cardiovasculaire et le système respiratoire. En condition physiologique, les deux systèmes se coordonnent vraisemblablement pour assurer une meilleure efficacité à chacun d'entre eux. L'utilisation d'une technique d'analyse harmonique, telle que la démodulation complexe, permet de suivre l'évolution temporelle du déphasage entre l'activité respiratoire et l'activité cardiovasculaire. En donnant des informations sur la synchronisation entre les différents systèmes physiologiques, les déphasages cardio-respiratoire et vasculo-respiratoire constituent des indicateurs de l'état du SNA.

**Respiration et système nerveux autonome.** Grâce à la possibilité du contrôle volontaire de la respiration, en fréquence et en volume, celle-ci est utilisée comme une sonde pour tester l'efficacité du contrôle du système cardiovasculaire par le système nerveux autonome. L'application des méthodes d'analyse des signaux en fréquence et temps-fréquence permet d'estimer les amplitudes et phases des oscillations cardiovasculaires et la sensibilité du baroréflexe à plusieurs fréquences respiratoires. Les changements de la variabilité des signaux cardiovasculaires induits par les variations de fréquence respiratoire constituent des indicateurs supplémentaires de l'état du SNA.

#### Application à la clinique :

- L'identification du Syndrome d'Apnées du Sommeil et des événements de haute résistance impliqués dans les pathologies respiratoires restent difficiles en l'absence de mesure de l'effort respiratoire, actuellement évalué au moyen d'une sonde oesophagienne. Des études ayant montré de fortes corrélations entre le temps de transit du pouls (TTP) et la pression oesophagienne, l'utilisation du TTP pourrait être une alternative à la manœuvre invasive que représente la pose d'une telle sonde. Le TTP est le temps mis par

---

[Ver96] 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.

une onde de pouls pour aller de la valve aortique jusqu'à la périphérie. Il est défini comme la distance comprise entre le pied de l'onde R de dépolarisation ventriculaire sur l'ECG et l'amplitude médiane de la pente diastolique-systolique de la pression artérielle. Cette étude s'inscrit dans le cadre de l'ACI SCAROMOCO. Elle est menée en collaboration avec le Service des Explorations Fonctionnelles ( Pr. P Escourrou, Hôpital A. Bécclère, Clamart), pour un projet d'étude de nouveaux capteurs et signaux pour le diagnostic et le traitement ambulatoire des Syndromes d'Apnées du Sommeil. Elle donne lieu à l'encadrement de plusieurs stages dont le premier est dévolu à la « Mise au point d'un algorithme de calcul du temps de transit du pouls (TTP) » dans LARY\_CR.

- Une analyse des effets de modifications ventilatoires sur les oscillations cardio-vasculaires est menée chez des patients de réanimation sous assistance ventilatoire. Plusieurs phases séquentielles, induisant des modifications des paramètres ventilatoires, les conduisent au sevrage progressif : ventilation totalement contrôlée, ventilation assistée contrôlée, aide inspiratoire, ventilation spontanée. L'objectif primaire de l'étude est d'évaluer les modifications respiratoires et cardio-vasculaires engendrées par les différents types de ventilation. L'objectif secondaire est de déterminer si ces modifications sont différentes selon l'issue ultérieure du sevrage (reprise correcte de la ventilation spontanée ou décès brutal) ; elles pourraient alors constituer un signal précoce d'alerte sur une possible décompensation cardiaque. Les facteurs ventilatoires intervenant dans la genèse des oscillations cardio-vasculaires communément étudiés jusqu'ici sont la fréquence respiratoire et le volume courant ( $V_t$ ), comme résultats « nets » de la mise en jeu de systèmes complexes, contrôlant essentiellement la durée de l'inspiration ( $T_i$ ) et d'autres paramètres ventilatoires comme le temps expiratoire et le débit inspiratoire moyen ( $V_t/T_i$ ). C'est pourquoi nous les mesurons dans cette étude, qui inclue une vingtaine d'enregistrements, comprenant l'ECG, la pression artérielle intrathoracique et le signal de débit respiratoire (étude en cours). Elle s'inscrit dans le cadre d'un Contrat de Recherche et d'Innovation Clinique 2001 par la DRC AP-HP, en collaboration avec le Service de Pneumologie du groupe hospitalier de la Pitié-Salpêtrière (Pr. JP Derenne, Dr. L. Mangin).
- Une analyse de l'impact du tabac et du sevrage tabagique sur les variabilités cardio-vasculaires et respiratoires est menée chez des sujets en cure de désintoxication ambulatoire. Le premier objectif est d'analyser les effets de l'intoxication tabagique sur les paramètres respiratoires et cardiaques précédemment décrits chez une vingtaine de patients, enregistrés avant la cure et une vingtaine de sujets témoins ; le second objectif est d'analyser les effets du sevrage tabagique chez 10 patients, réenregistrés au bout de quatre mois de cure. Cette étude est effectuée en collaboration avec le Dr. L Mangin, Service de pneumologie du groupe hospitalier de la Pitié-Salpêtrière (Pr. JP Derenne).
- Une analyse des modifications des variabilités cardiovasculaires survenant au cours d'angioplasties carotidiennes avec pose de ballonnet et stent est menée chez des patients porteurs de sténose athéromateuse. Cette étude donne accès à l'observation directe du barorécepteur carotidien. En effet, les altérations hémodynamiques et autonomiques décrites au cours de cette intervention sont attribuées à une stimulation du barorécepteur carotidien par le gonflement du ballonnet. On analyse les modifications des oscillations cardio-vasculaires et de la fréquence respiratoire de 10 patients. Le rythme cardiaque (signal RR) et la fréquence respiratoire sont ralentis, la pression artérielle est diminuée,

les oscillations CV sont réduites en amplitude. La fréquence centrale des spectres de puissance du RR et de la respiration est déplacée vers les basses fréquences. Ces modifications sont encore présentes au bout de 24 heures, témoignant d'effets baroreflexes durables. Cette étude est conduite en collaboration avec le Dr. L. Mangin, et le service de chirurgie vasculaire du Dr. Becquemin de l'hôpital Henri Mondor.

#### 6.3.4 Modélisation du centre de commande respiratoire

**Participants :** Daniel Claude, Alessandro Monti.

Les approches de modélisation et de simulation ont permis de valider des hypothèses biologiques et de proposer des réponses à des questions auxquelles aucune expérience électrophysiologique ni pharmacologique n'avait jusqu'alors su répondre.

- Les mécanismes présidant à la genèse des rythmes sont encore mal connus, et en particulier il n'est pas encore établi si ces rythmicités résultent des propriétés intrinsèques de certains neurones (activité pacemaker<sup>[JHK<sup>+</sup>91]</sup>), ou si elles constituent une propriété du réseau du tronc cérébral (activité de réseau<sup>[UKJB94]</sup>). Le modèle suppose que l'activité périodique neuronale ne puisse pas émerger de l'activité du réseau et qu'il est donc nécessaire d'inclure des neurones pacemakers à l'intérieur du rhombomère pour créer une activité périodique conforme aux caractéristiques observées expérimentalement.
- Le rôle coordonnateur à long terme de l'action neuromodulatrice à l'intérieur du rhombomère a été suggéré, mais aucune expérience physiologique n'a pu encore le mettre en évidence. Le modèle propose l'existence d'une action de coordination à long terme (action neuromodulatrice) et à court terme (action Glu-ergique excitatrice) étendue à tous les neurones qui constituent le rhombomère et ainsi qu'entre les différents rhombomères.
- Associées à deux modes de décharges distincts, plusieurs observations électrophysiologiques ont permis de distinguer deux sous-populations neuronales au sein du réseau. Les neurones dits de type I et II ont les mêmes propriétés électrophysiologiques et se déchargent en phase avec les nerfs moteurs.

Les neurones dits de type III se déchargent en opposition de phase avec les nerfs moteurs. Le modèle propose que la différenciation entre neurones de type I et II, et neurones de type III, ainsi que la similarité entre neurones de type I et neurones de type II sont deux aspects indispensables au fonctionnement physiologique du réseau embryonnaire.

- A la suite de différentes expériences en laboratoire, l'hypothèse de l'existence concomitante d'unités « co-activatrices » et d'unités « génératrices » à l'intérieur du simple rhombomère avait été avancée<sup>[CF97]</sup>. Le modèle reprend cette structure dans laquelle les neurones de type I et II sont les unités « co-activatrices » responsables de l'activité co-

---

[JHK<sup>+</sup>91] J.C. SMITH, H. ELLENBERGER, K. BALLANYI, D.W. RICHTER, J.K.L. FELDMAN, « Pre-Bötzinger complex: a brain stem region may generate respiratory rhythm in mammals », *Science Wash. DC* 254, 1991, p. 726–729.

[UKJB94] U.J. BALIS, K.F. MORRIS, J. KOLESKY, B.G. LINDSEY, « Simulations of a ventrolateral medullary neural network for respiratory rhythmogenesis inferred spike train cross-correlation. », *Biol. Cybern.* 70, 1994, p. 311–327.

[CF97] J. CHAMPAGNAT, G. FORTIN, « Primordial respiratory like rhythm generation in the vertebrate embryo. », *Trends Neuroscience* 20, 1997, p. 119–124.



ordonnée entre les différents rhombomères. Les neurones de type III correspondent aux unités « génératrices » qui diffèrent entre rhombomères par le nombre de leurs récepteurs Gaba-ergiques, ce qui conduit à une activité intrinsèque différente pour chaque segment du réseau rhombomérique.

Ce thème de recherche a abouti au développement d'un modèle de rhombomère à même de reproduire les principales caractéristiques physiologiques établies à la suite de plusieurs expériences électrophysiologiques et pharmacologiques. L'approche de modélisation et de simulation a permis de proposer des modes de connexions entre les différents rhombomères et représentent un modèle possible du fonctionnement de la commande nerveuse de la respiration automatique adulte.

### 6.3.5 Analyse de VCG à l'aide de l'algorithme de « Matching Pursuit »

**Participants :** Catherine Bonnet, Jonathan Partington, Michel Sorine.

L'algorithme de « Matching Pursuit » introduit dans [SZ93] permet la reconstruction d'un élément  $f$  d'un espace de Hilbert  $H$  à partir d'un ensemble fixé de vecteurs (un dictionnaire de vecteurs normalisés  $\{g_\alpha, \alpha \in A\}$  où  $A$  est en général fini mais ce n'est pas nécessaire). Cet algorithme a la propriété de pouvoir fonctionner avec un petit nombre de données; il a été utilisé avec succès dans des problèmes de traitement de signal ou d'images pour lesquels il s'agit d'extraire l'information significative d'un grand nombre de données.

Nous avons proposé une version relaxée de cet algorithme (qui conduit à une convergence plus rapide dans certains cas) ainsi qu'une version vectorielle et l'avons appliquée à la reconstruction de signaux Vecto-cardiographiques à partir de fichiers de données fournis par L. Mangin (3 vecteurs de  $\mathbf{R}^3$  obtenus en plaçant trois dérivations sur le patient).

### 6.3.6 Modélisation et commande de la fonction ovarienne

**Participants :** Daniel Claude, Frédérique Clément.

Un modèle mathématique du contrôle de la dynamique de production d'AMPc par les cellules de granulosa, en réponse à FSH, a été développé [32], dans le cadre du formalisme des équations différentielles non linéaires contrôlées. C'est une étape dans la compréhension du mécanisme d'action de cette hormone majeure de régulation de la fonction ovarienne. La capacité des cellules de la granulosa à produire de l'AMP cyclique (AMPc) en réponse à FSH augmente progressivement au cours du développement folliculaire terminal. Le contrôle de la concentration intracellulaire en AMPc implique à la fois des processus biochimiques survenant à une échelle de temps de la seconde ou de la minute (liaison ligand/récepteur, désensibilisation, internalisation), et des processus physiologiques plus lents (s'étalant sur un à plusieurs jours), qui se ramènent principalement à une modification de l'efficacité de couplage entre la stimulation des récepteurs par FSH et l'activation de l'enzyme adénylyl cyclase synthétisant l'AMPc. Tout en décrivant l'évolution temporelle des concentrations moyennes en espèces

---

[SZ93] S.G. MALLAT, Z.F. ZHANG, « Matching pursuits with time-frequency dictionaries », *IEEE Trans. Signal Processing* 41, 1993, p. 3397–3415.

membranaires (récepteurs libres, liés à FSH sous forme active ou phosphorylée, adénylyl cyclase), le modèle est centré sur l'étude de la teneur intracellulaire en AMPc qui résulte des interactions entre les dynamiques lentes et rapides. L'exposition à un stimulus constant en FSH conduit la concentration en AMPc à une valeur d'équilibre stable. Le comportement transitoire de la teneur en AMPc, ainsi que le délai nécessaire pour se rapprocher de l'équilibre, varient en fonction des valeurs affectées aux paramètres du modèle, qui ont une signification biologique directe. La réponse du modèle vis-à-vis d'un stimulus non constant en FSH (à partir de données expérimentales) a aussi été étudiée. Les points de rencontre du modèle avec la démarche expérimentale concernent donc, d'une part, l'influence des paramètres du modèle sur les niveaux d'AMPc intracellulaires atteints à l'équilibre en cas d'exposition à un stimulus FSH constant, et, d'autre part, la prédiction de la dynamique de production d'AMPc observée en réponse à un profil donné de l'entrée FSH. Une réponse inadaptée des cellules de la granulosa vis-à-vis de FSH pouvant avoir des répercussions dramatiques sur le développement folliculaire, un modèle réaliste caractérisant à la fois la transduction physiologique et pathologique du signal FSH devrait se révéler très utile pour simuler de nouvelles approches thérapeutiques.

Ce travail est mené dans le cadre du programme de recherche « Automatique, Biologie et Santé, Modélisation et commande des régulations biologiques ».

### 6.3.7 Commande chronopharmacologique en clinique : applications en bactériologie et en cancérologie

**Participants** : Jean Clairambault, Daniel Claude.

Dans le cadre de l'application à l'antibiothérapie, un modèle différentiel de la toxicité rénale des aminoglycosides a été développé, incluant une modulation circadienne de la clairance de la créatinine. La comparaison des niveaux sériques d'aminoglycosides, représentant l'efficacité du traitement, avec l'évolution de la clairance de la créatinine, mesurant la fonction rénale et représentant donc la néphrotoxicité du médicament, permet de définir un index thérapeutique qui dépend pour chaque patient de la clairance initiale de sa créatinine. De plus, ce modèle permet de confirmer que l'administration d'une dose unique à une heure précise de la journée minimise cette néphrotoxicité.

Dans le cadre de l'application à la cancérologie, un modèle différentiel prenant en compte l'efficacité antitumorale et la toxicité intestinale a été développé, avec identification des paramètres dans le cas de l'oxaliplatine pour l'ostéosarcome de Glasgow chez l'animal. Ce modèle en cours d'évaluation, qui inclut une description simplifiée de la croissance de la population des entérocytes, ainsi qu'une modulation circadienne et de la toxicité intestinale et de l'efficacité antitumorale, devrait permettre d'optimiser l'heure de début et la durée d'injection dans des schémas chronomodulés déjà utilisés en clinique, en particulier dans le cas du traitement par oxaliplatine du cancer colorectal.

Ce travail est mené dans le cadre du programme de recherche « Automatique, Biologie et Santé, Modélisation et commande des régulations biologiques ».

## 6.4 Méthode d'« Adéquation Algorithmme Architecture »

**Participants** : Liliana Cucu, Catalin Dima, Rachid Djenidi, Thierry Grandpierre, Linda

Kaouane, Rémy Kocik, Cristophe Macabiau, Kamel Méziane, Yves Sorel.

**Résumé :** *Amélioration du modèle d'algorithme pour prendre en compte des nouveaux types d'arcs représentant des transferts de données sans précédence et des contraintes de précédence sans transfert de donnée, et pouvoir spécifier des contraintes temps réel multiples de cadence et de latence. Evolution de l'heuristique d'optimisation de la distribution et de l'ordonnancement pour multicomposant dans le cas d'une seule latence égale à la cadence afin de prendre en compte les nouveaux types d'arcs et la tolérance aux pannes. Etude d'heuristiques permettant de prendre en compte plusieurs cadences et plusieurs latences sans préemption, et avec préemption en la minimisant. Etudes d'heuristiques d'optimisation de la distribution et de l'ordonnancement pour circuit intégré spécifique dans le cas d'une seule latence égale à la cadence. Etude du générateur d'exécutif pour prendre en compte les nouveaux types d'arcs. Réalisation d'un générateur de net-list pour circuits intégrés FPGA basé sur VHDL structurel. Réalisation d'un noyau d'exécutif SynDEx V5.2 pour processeurs TMS320C60 communicant par mémoire partagée et passage de messages. Développement de SynDEx V6.3 programmé en Caml/Tk permettant de faire des spécifications algorithmiques hiérarchiques avec de la répétition finie et du conditionnement par des entiers de sous-graphe avec des transferts de données sans précédence et des contraintes de précédence sans transfert de donnée, permettant de spécifier des contraintes multiples de latences et de cadence, et enfin permettant de générer des exécutifs compatibles V5.2 ainsi que des net-lists pour FPGA de la famille Xilinx.*

## Modèles d'algorithme, d'architecture et d'implantation

Nous avons introduit dans notre modèle d'algorithme qui est un graphe de dépendances de données factorisé et conditionné, deux nouveaux types d'arcs : des arcs de précédence seulement et des arcs de données seulement, alors que jusqu'à présent nous avions des arcs de précédence et de données (les précédences étant imposées par les données dans les graphes de dépendances de données). Ce dernier type d'arc, qui est le plus contraignant, avait été étudié en priorité à cause des applications faisant intervenir des algorithmes d'automatique et de traitement du signal et des images, pour lesquelles il est impératif de maintenir une cohérence entre l'ordre d'exécution des opérations et l'ordre dans lequel ces opérations accèdent aux données en lecture et en écriture. De plus, nous avons étendu ce modèle afin de pouvoir prendre en compte des contraintes multiples de cadence et de latence. Toutes les opérations peuvent maintenant être spécifiées avec une période. Si la période d'une opération n'est pas spécifiée elle sera éventuellement déduite de celle d'autres opérations avec lesquelles elles sont en relation, après vérification de leur cohérence.

Nous faisons actuellement l'hypothèse que toutes les opérations d'entrée du graphe (opérations sans prédécesseur) ont une période c'est à dire sont soumises à une contrainte de cadence. En général on peut assez facilement se ramener à ce cas en remplaçant une opération d'entrée aperiodique par une opération périodique dont la période est telle que l'on soit assuré que tous les événements (dont le nombre peut à l'extrême se réduire à un) acquis par l'opération

apériodique seront acquis par l'opération périodique. Comme dans le modèle de l'année précédente, une opération périodique (répétée infiniment), peut aussi être répétée un nombre fini de fois (répétition spatiale ou temporelle, i.e. itération). On peut aussi maintenant spécifier autant de latences que nécessaire entre une entrée de n'importe quelle opération et une sortie de n'importe quelle autre opération du graphe de l'algorithme, que ces opérations soient ou non des entrées ou des sorties (opérations sans successeur) du graphe.

Nous avons validé la généralité du modèle d'architecture défini l'année dernière dans plusieurs applications industrielles mettant en jeu des processeurs de traitement du signal et des microcontrôleurs de différents types, tous interconnectés par différents types de réseau et selon différentes topologies. En particulier, nous avons testé des architectures où certaines communications inter-processeur se faisaient à par mémoire partagée (RAM) et d'autres par passage de messages (SAM).

Nous avons validé le modèle d'implantation avec les deux nouveaux types d'arcs et les contraintes temps réel multiples dans le cadre d'applications industrielles du domaine de l'automobile.

## Optimisation

Dans le cadre de l'optimisation de la distribution et de l'ordonnancement sur multicomposant, pour une contrainte temps réel unique de cadence égale à la latence sans préemption, notre heuristique est fondée sur une fonction de coût prenant en compte à la fois la marge d'ordonnancement et l'allongement du chemin critique. Nous l'avons étendue pour prendre en compte les deux nouveaux types d'arcs et la tolérance aux pannes. Les arcs de précedence seulement n'introduisent pas de communication inter-opérateur du point de vue de la distribution. Ils se traitent comme les arcs de précedence et de données du point de vue de l'ordonnancement. Les arcs de données seulement sont traités comme les arcs de précedence et de données du point de vue de la distribution. Comme il n'y a plus de contrainte de précedence les opérations reliées par ce type d'arc peuvent être ordonnancées n'importe quand. Elles servent donc à minimiser les périodes d'inactivité quand cela est possible. Nous cherchons pour l'instant à tolérer les pannes de type silence sur panne ou silence intermittent sur panne des opérateurs et des moyens de communications. Pour cela nous calculons avec l'heuristique précédente chacun des distributions-ordonnements possibles relativement aux différents cas de pannes acceptés. Celles-ci sont connues par l'intermédiaire de la redondance matérielle qui est spécifiée par l'utilisateur dans le graphe de l'architecture. Nous effectuons ensuite une fusion de tous ces distributions-ordonnements. L'idée de la fusion est de calculer pour chaque processeur (resp. moyen de communication) l'union des opérations (resp. dépendances de données) issues de tous les ordonnancements simples, puis de supprimer les opérations redondantes (resp. dépendances de données), et enfin de calculer un ordonnancement des opérations restantes qui soit consistant avec le graphe d'algorithme initial. Ces travaux sur la tolérance aux pannes sont menés en collaboration avec le projet INRIA BIP comme suite à l'ARC TOLERE.

Nous avons exploité le modèle de graphe adapté à la prise en compte de contraintes temps réel multiples (latences et cadences) dans le cas des architectures multicomposant, pour poser clairement ce nouveau problème d'optimisation. Il y a peu de résultats dans la littérature sur la résolution des problèmes d'ordonnancement pour des systèmes soumis à la fois des contraintes

de périodicité (cadence) et des contraintes de latence, et qui de plus imposent des précédences d'exécution (éventuellement induites par des dépendances de données). La notion de latence étant assez mal définie nous avons montré qu'elle était équivalente à la notion de dead-line, pour laquelle il existe des résultats d'ordonnancement. Nous avons proposé un algorithme permettant de trouver un ordonnancement monocomposant, pour l'instant sans préemption, qui respecte les contraintes temps réel multiples. Nous avons démontré, dans le cas où les entrées du graphe sont périodiques, que cet algorithme était optimal, dans le sens où s'il existe un ordonnancement notre algorithme le trouvera. Pour le cas des entrées aperiodiques le problème est beaucoup plus complexe. Nous étudions actuellement l'intérêt d'introduire de la préemption uniquement quand elle est nécessaire, i.e. quand elle permet de diminuer la latence, ceci afin de minimiser ses effets néfastes dus aux changements de contextes dynamiques lors de l'exécution en temps réel. Nous envisageons de nous servir de cet algorithme d'ordonnancement monocomposant pour proposer une heuristique dans le cas multicomposant. En effet, passer du cas monocomposant au cas multicomposant rend généralement le problème NP-difficile (explosion combinatoire relativement au nombre de composants devenant supérieur à un). Nous envisageons aussi de démontrer que ce problème est effectivement NP-difficile.

En ce qui concerne l'optimisation de l'ordonnancement dans le cas d'un circuit intégré spécifique nous l'avons appliqué pour l'instant aux circuits reconfigurables FPGA de la famille Xilinx. Nous avons étudié une heuristique gloutonne et une heuristique de type recuit simulé de défactorisation partielle (transformation spatiale/temporelle) dont la fonction de coût prend en compte la contrainte temps réel et le nombre de CLB (Configurable Logic Blocks), c'est-à-dire le nombre de fonctions logiques de base fournies par le FPGA. Elle est fondée sur la caractérisation des opérations de calcul de l'algorithme relativement à leur équivalent en termes de circuits combinatoires correspondant à la synthèse du chemin de données, et sur la caractérisation des opérations de factorisation infinie (prise en compte de l'aspect réactif) et finie (prise en compte des boucles) en termes de circuits séquentiels correspondant à la synthèse du chemin de contrôle. Ces circuits séquentiels réalisent, entre autres, la commande des registres nécessaires aux transferts de données entre circuits combinatoires du chemin de données. Nous étudions actuellement la prise en compte du conditionnement pour la synthèse du chemin de contrôle. Ces travaux sur l'optimisation d'implantation sur circuits intégrés sont menés en collaboration avec le laboratoire A2SI de l'ESIEE.

### **Génération d'exécutif et de net-list**

La génération d'exécutif a été revue pour permettre la prise en compte simultanée des répétitions finies et du conditionnement, et pour permettre de faire simultanément des communications inter-processeur par mémoire partagée RAM et par passage de messages via des SAM.

Nous avons continué à collaborer avec le laboratoire A2SI de l'ESIEE pour développer un générateur de net-list basé sur VHDL structurel dans le cas des circuits reconfigurables FPGA de Xilinx. La net-list produite est utilisée pour synthétiser le code de programmation des FPGA à l'aide d'outils de synthèse classiques. Nous participons également à l'action incitative « Systèmes Reconfigurables » des PRC-GDR ISIS et ANM, pour étudier l'environnement de programmation du prototype ARDOISE composé de circuits FPGA reconfigurables dynamiques.

quement.

Nous participons actuellement à l'élaboration d'un projet de plate-forme pour la validation, l'émulation et la conception de systèmes embarqués, nommé VEC6, à soumettre au RMNT (réseau de recherche en Micro et Nano Technologie).

### **SOC (System-On-a-Chip) :**

Nous avons terminé le projet RNRT PROMPT, en collaboration avec Thales-Communications, Thales-LCR, Simulog et le laboratoire CRI de l'Ecole des Mines de Fontainebleau, sur l'adaptation de la méthodologie AAA et de SynDEx pour la programmation optimisée des SOC's envisagés dans les applications avancées de télécommunication, qui comportent sur le même circuit un calculateur SIMD homogène (un seul séquenceur d'instructions pour plusieurs unités de calcul) et un calculateur MIMD, le tout constituant un calculateur MIMD hétérogène. La méthodologie PLC2 et l'outil EPHORAT qui la supporte, développés par le LCR en collaboration avec le CRI, sont bien adaptés à la programmation optimisée des processeurs SIMD. Nous avons fait coopérer SynDEx et EPHORAT afin de réaliser l'implantation d'un algorithme de télécommunication basée sur la nouvelle norme de protocole UMTS sur un SOC comprenant un processeur SIMD, un DSP en virgule flottante et un processeur RISC ARM. Nous avons commencé à étudier le noyau d'exécutif pour ce SOC afin de générer automatiquement des exécutifs adaptés pour le multi-processeur MIMD formé du DSP et du RISC. Nous étudions avec Esterel-Technologie et Nokia la possibilité de poursuivre ce projet dans un cadre Européen, en élargissant à la fois les objectifs techniques et les partenaires.

### **Logiciel d'aide à l'implantation SynDEx**

La version 5.2 de SynDEx, avec générateur d'exécutif pour architectures cibles hétérogènes et noyau d'exécutif pour réseau de stations de travail sous C-UNIX-TCP/IP, a continué à être diffusée gratuitement sur le site Web à l'URL : <http://www-rocq.inria.fr/syndx>. Le logiciel est accompagné d'une documentation hyper-texte qui décrit son utilisation ainsi que la manière de réaliser de nouveaux noyaux d'exécutifs dépendant des processeurs et des moyens de communication inter-processeur. Un noyau d'exécutif pour microcontrôleur MPC555 basé sur un cœur de processeur PowerPC connecté à deux interfaces avec le bus CAN et une bibliothèque de fonctions applicatives pour la commande bas niveau du CyCab, a été développé avec la société Robosoft qui commercialise ce véhicule électrique semi-autonome programmé avec SynDEx. Ce noyau a été testé dans le cas d'une application de conduite manuelle. Un noyau d'exécutif pour TMS320C60 est en cours de développement avec le laboratoire ARTIST de l'INSA et le laboratoire des télécommunications de Mitsubishi, tous les deux situés à Rennes.

Une nouvelle version de SynDEx, la V6.3, est en cours de développement. Elle est programmée en Caml/Tk et possède en plus des fonctionnalités de la V5.2, la possibilité de faire des spécifications hiérarchiques, de la répétition finie et/ou du conditionnement de sous-graphes par des entiers. Elle permet de décrire des architectures multicomposant dont les processeurs communiquent par mémoire partagées ou par passage de messages. Elle offre une heuristique d'optimisation de distribution et d'ordonnancement dans le cas d'une contrainte unique de cadence égale à la latence pour les architectures multicomposant, ne permettant pas pour

l'instant la défactorisation partielle automatique. L'utilisateur peut choisir entre une défactorisation totale et aucune défactorisation. Elle génère automatiquement des exécutifs distribués temps réel à partir des noyaux existants développés pour SynDEx V5.2. Elle permet aussi de produire une net-list pour un circuit intégré réalisé sur un FPGA de type Xilinx, qui peut être utilisé à son tour dans une architecture multicomposant. Cette nouvelle fonctionnalité a été réalisée en collaboration avec le laboratoire A2SI de l'ESIEE.

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

### 7.1 Modélisation de la pollution et de la consommation de moteurs essence

**Participants :** Pascal Emery, Michel Sorine, Antoine Viel.

Contrat Renault 1 99 D046 00 21102 01 2 (contrat d'accompagnement du CIFRE de P. Emery). Cette étude est réalisée en collaboration avec le LABORATOIRE DE THERMODYNAMIQUE APPLIQUÉE AUX MACHINES THERMIQUES de l'université de Paris VI (Fadila Maroteaux). Elle se focalise sur la « Modélisation simplifiée des moteurs essence à injection directe à charge stratifiée par réduction des modèles physiques multidimensionnels ».

**Les besoins à l'origine de l'étude.** L'optimisation moteur multi-critère (consommation, pollution, confort) est un problème complexe car reposant sur un grand nombre de paramètres de réglage. L'outil de calcul peut permettre de dégrossir ce travail et gagner ainsi du temps. Les besoins sont divers :

- En calcul prédictif : à partir de quelques premières données expérimentales, être capable de valider l'intérêt de certains concepts et de l'adéquation moteur/boîte, vis-à-vis des niveaux de consommation et de seuils de pollution.
- En calibration : ne pas balayer systématiquement tous les degrés de liberté pour trouver un minimum mais dégrossir la minimisation avec un modèle recalé sur quelques points, puis affiner localement.
- En contrôle moteur enfin : pour évaluer en simulation l'impact de certaines gestions de transitoires, en évitant l'usage de grosses cartographies (coûteuses en essais au banc moteur). Une réduction suffisante des modèles peut conduire à leur utilisation dans les stratégies de contrôle (modèles couple/ $NOx$  pour la gestion des pots catalytiques de réduction des  $NOx$  ...).

**Les objectifs du travail** . À partir des paramètres caractéristiques du moteur, l'objectif est de synthétiser un modèle de simulation complet donnant les caractéristiques des gaz d'échappement (température, débit, composition), la consommation et le couple. Ce modèle devra prendre en compte les tendances mises en évidence sur les données expérimentales. Il devra être basé le plus possible sur des considérations physiques. Cette année il a été le point de départ d'une phase de réduction afin d'en déduire des versions partiellement embarquables dans un calculateur. Ce modèle devra permettre d'évaluer l'impact d'évolutions d'organes : effet d'EGR, ajout d'un turbo, effet VVT (Variable Valve Timing) ...

## 7.2 Exemples de problèmes d'automatique des systèmes hybrides : modélisation, optimisation et commande de divers groupes motopropulseurs

**Participants** : Nathalie Méau de, Michel Sorine.

Contrat Renault 1 98 D341 00 21102 01 2 (contrat d'accompagnement du CIFRE de N. Méau de).

Les premiers travaux réalisés concernent la modélisation et l'optimisation d'un Groupe Moto-Propulseur (GMP) avec moteur à Injection Directe d'Essence (IDE) et Boîte de Vitesses Automatique (BVA), en vue de la réduction de la consommation tout en respectant les normes de pollution imposées par la communauté européenne. Un code de calcul de modélisation a été développé intégrant les aspects chaîne dynamique du GMP, consommation, pollution, transitoires thermiques ainsi que les stratégies de pilotage des organes du GMP (ex : lois de passage de la BVA). Ce modèle a pu être validé en comparant les simulations ainsi obtenues à celles produites par un logiciel de référence de l'entreprise. Le problème d'optimisation du GMP en consommation sous contrainte de pollution a été formalisé, ce qui a permis de choisir des méthodes d'optimisation adaptées : optimisation d'une part par pénalisation et d'autre part par programmation dynamique. Les codes d'optimisation correspondants s'appuyant sur le modèle développé, ont été réalisés. Une étude de la séparabilité de l'optimisation en consommation sous contrainte de pollution a montré qu'il était sous-optimal d'optimiser les fonctionnements d'une part du moteur et d'autre part de la BVA. Cette sous-optimalité a été quantifiée par la comparaison des résultats obtenus avec une optimisation globale du GMP et ceux issus d'une optimisation séparée du moteur et de la BVA. Le faible gain dégagé par l'optimisation globale du GMP, par rapport à une optimisation séparée, ne justifie pas la profonde modification nécessaire au pilotage du moteur et de la BVA dans un véhicule commercialisé. Par ailleurs, une analyse de sensibilité a montré la faible dépendance des résultats d'optimisation aux paramètres dimensionnants du GMP, excepté dans le cas où ils permettraient de modifier les rapports de boîte utilisés sur le cycle normalisé européen, sur lequel les optimisations sont effectuées.

Les travaux, cette année, ont concerné la modélisation et la commande de GMP hybrides (thermique et électrique).

## 7.3 Application des modèles de frottements secs à la caractérisation de suspensions à lames pour poids-lourds

**Participants** : Arnaud Clavel, Michel Sorine, Qinghua Zhang.

Contrat Renault 1 99 C303 00 31312 01 2 (contrat d'accompagnement du CIFRE de A. Clavel). Ce travail est fait en collaboration avec le projet Sigma2. Il concerne l'identification paramétrique sur des modèles non linéaires pour application en dynamique des véhicules poids lourds.

Les véhicules routiers, automobiles et poids lourds, présentent des comportements parfois instables en fonction notamment de la vitesse, de l'adhérence de la route, ou de leur chargement. L'analyse du comportement dynamique des véhicules est donc d'une grande importance. Renault et Renault VI ont développé des modèles de comportement dynamique de



véhicule pour comprendre, prédire et améliorer les véhicules étudiés, mais aussi pour étudier des systèmes électroniques corrigeant certaines instabilités. Il s'agit des systèmes de contrôle dynamique de trajectoire par freinage différentiel des roues dont les premiers exemples sont en cours d'introduction sur certaines automobiles haut de gamme. Intégrant de nombreux capteurs, un calculateur, et des actionneurs du type ABS, ces systèmes de contrôle de trajectoire agissent automatiquement sur les freins du véhicule afin d'en corriger son comportement quand ce dernier s'écarte trop d'un comportement nominal « sain ».

L'étude de ces systèmes fait apparaître 2 axes de progrès :

- Amélioration de la modélisation dynamique par l'introduction de modèles hystérétiques dans la suspension. Le phénomène physique à modéliser correspond à des frottements secs au niveau des lames des suspensions.
- Amélioration des lois de commande par une meilleure estimation des paramètres physiques du véhicule et de son environnement. En effet, la performance du système de contrôle de trajectoire serait grandement améliorée par une meilleure estimation des paramètres caractéristiques tels l'adhérence ou la hauteur du centre de gravité qui définissent le seuil de renversement.

Ces 2 axes nécessitent la mise en oeuvre de techniques d'identification paramétrique sur des modèles linéaires et non linéaires. L'identification hors ligne des paramètres des modèles d'étude permet de garantir une corrélation entre simulation et essais réels, tandis qu'une identification en ligne doit permettre d'affiner les stratégies des lois de commande du système de contrôle de trajectoire.

L'objectif du travail de recherche est donc de concevoir et de mettre en oeuvre des méthodes d'identification paramétrique sur des modèles linéaires et non linéaires utilisés par Renault et Renault VI dans les domaines de la dynamique des véhicules routiers, et éventuellement proposer des adaptations pour ces modèles afin de faciliter le processus d'identification. Il y a deux directions principales :

- Modélisation. Cette étape consiste à définir une structure de modèle pour prendre en compte les frottements secs dans les suspensions.
- Identification paramétrique. Il s'agit dans un premier temps, de mettre en oeuvre et d'améliorer les méthodes d'identification paramétriques existantes, basées sur une connaissance physique du comportement dynamique du véhicule.

Une première application consistera à appliquer les travaux à un banc de malaxage actuellement utilisé pour faire des essais d'endurance sur les suspensions des véhicules industriels. Une seconde application consistera à appliquer les travaux sur véhicule roulant.

## 7.4 Modélisation réduite pour la commande d'une Pile à Combustible

**Participants :** Karim Bencherif, Michel Sorine.

Contrat Renault 1 00 D0256 00 21102 012. Afin de réduire la consommation et les émissions de polluants de ses futurs véhicules, Renault étudie de nouveaux modes de motorisation ayant de forts potentiels vis-à-vis de ces objectifs. Un des modes envisagés concerne les systèmes dits « Pile à Combustible ». Une Pile à Combustible est un système présentant des caractéristiques très différentes de celles d'un moteur thermique traditionnel. Le mode de production de l'énergie utilise des principes pour lesquels peu de modèles et peu de lois de commande

existent.

La présente étude a pour objectif de mener des travaux de modélisation et de commande qui devraient permettre d'aborder des problèmes de dimensionnement, de gestion globale de l'énergie, de surveillance diagnostic dans les futurs véhicules à piles à combustible et réformeur essence. Elle donne lieu à la préparation e la thèse de K. Bencherif dans le cadre d'une convention CIFRE.

## 7.5 CyCab du projet IMARA

**Participants :** Thierry Grandpierre, Rémy Kocik, Yves Sorel.

SynDEx est utilisé pour programmer et optimiser les applications s'exécutant en temps réel sur l'architecture multi-processeur du véhicule électrique hurbain CyCab. Nous avons réalisé avec le laboratoire COSI de l'ESIEE un simulateur en Scicos du CyCab. Nous collaborons aussi avec le laboratoire COSI pour réaliser de nouvelles applications pour le CyCab permettant de faire de l'aide à la conduite comme de l'évitement d'obstacles, basé sur l'utilisation de capteurs ultra-son ou/et caméra à faible coût.

## 7.6 Collaboration Robosoft

**Participants :** Thierry Grandpierre, Yves Sorel.

Dans le cadre des travaux sur le logiciel du CyCab qui est industrialisé par Robosoft nous avons participé à la réalisation d'un noyau d'exécutif SynDEx pour le processeur MPC555 possédant un cœur de PowerPC et pour le processeur i80x86 sous Linux/RTAI, tous deux utilisés dans le CyCab. Nous avons travaillé sur l'amélioration des lois de commande bas niveau des moteurs et des freins dans l'application de conduite manuelle au joystick.

## 7.7 Thomson-CSF-Télécommunications, Thomson-CSF-LCR, Simulog

**Participants :** Thierry Grandpierre, Yves Sorel.

Dans le cadre du projet RNRT PROMPT nous avons adapté la méthodologie AAA et le logiciel SynDEx à la programmation optimisée d'applications avancées de télécommunication sur multi-SOC (System On a Chip). L'architecture utilisée est hétérogène, chaque SOC contient un processeur SIMD, un processeur RISC, un processeur de traitement du signal et des moyens de communication intra-SOC et inter-SOC.

## 7.8 Contrat Synopsis-Castor

Le noyau d'exécutif SynDEx pour l'ADSP2160 (SHARC) qui est utilisé dans les calculateurs multiprocesseur de Synopsis-Castor, développé les années précédentes pour SynDEx V4, est en cours de portage pour SynDEx V5 et V6.

## 7.9 Collaboration EADS

**Participants :** Thierry Grandpierre, Yves Sorel.

Nous collaborons depuis plusieurs années avec EADS sur l'optimisation avec AAA/SynDEX des ressources matérielles nécessaires dans les applications temps réel de traitement d'image présentant des nids de boucles imbriqués. Dans le cadre du projet RNTL ACOTRIS nous avons étudié le cas d'une application temps réel d'appariement d'image à implanter de manière optimisée sur des réseaux de processeurs de traitement du signal ADSP21060 communicant par passage de messages et par mémoire partagée.

## 8 Actions régionales, nationales et internationales

### 8.1 Actions nationales

#### 8.1.1 ACI SCARAMOCO (Système Cardio-Respiratoire : une Approche MODélisation et COMmande)

**Participants :** Pierre-Alexandre Bliman [coordonnateur de l'action], Jean Clairambault, Daniel Claude, Frédérique Clément, Claire Médigue, Alessandro Monti, Michel Sorine.

Cette Action Concertée Incitative « Technologies pour la Santé » a démarré fin 2001. Le projet est organisé autour de la modélisation, l'analyse et la commande du système cardio-respiratoire. Celui-ci est vu comme un système commandé constitué d'une boucle de régulation à court terme de la pression artérielle (dans laquelle le système nerveux autonome est le contrôleur, le barorécepteur artériel le capteur principal, et le cœur, l'actionneur principal), en interaction avec une boucle de régulation à plus long terme de la pression partielle en oxygène dans le sang. En complément d'une approche de modélisation mathématique privilégiant les aspects non-linéaires, l'approche systémique propre à l'Automatique permettra d'envisager la compréhension globale des régulations à l'œuvre et de déterminer la nature des commandes endogènes ou exogènes appliquées ou applicables.

Nos partenaires sont : Laboratoire des Explorations Fonctionnelles EA-2704, Hôpital Antoine Béchère (P. Escourrou, Y. Papelier) ; Laboratoire Gage, Ecole Polytechnique (F. Ollivier) ; UPR 2216, Institut de Neurobiologie Alfred Fessard (J. Champagnat) ;

#### 8.1.2 Actions de recherche coopératives Inria

- Action de Recherche Coopérative ICEMA.

**Participants :** Jean Clairambault, Frédérique Clément [coordonnatrice de l'action], Claire Médigue, Alessandro Monti, Michel Sorine.

Voir la page web suivante qui décrit l'activité de cette action <http://www-rocq.inria.fr/who/Frederique.Clement/icema.html>

Projets EPIDAURE, MACS, SINUS et SOSSO

Intitulé : Images de l'Activité Électro-Mécanique du Cœur.

### 8.1.3 Programme de recherche interdisciplinaire « Modélisation et commande des régulations biologiques »

**Participants** : Jean Clairambault, Daniel Claude [coordonnateur du programme], Frédérique Clément, Claire Médigue, Alessandro Monti, Michel Sorine.

Ce programme de recherche a reçu le soutien du CNRS (GdR Automatique) et de la Direction de la Recherche du MENRT (Actions spécifiques du Département de la physique et des sciences pour l'ingénieur). On pourra se reporter aux actes de la journée thématique de mai 1999 pour connaître l'ensemble du programme et des participants (<sup>[Cla00]</sup>). Les thèmes abordés sont :

1. Persistance bactérienne et adaptation de posologie.
2. Modélisation et commande de la fonction ovarienne.
3. Modélisation, simulation et étude expérimentale des mouvements du bras.
4. Modélisation du rythme cardiaque sous le contrôle du système nerveux autonome.
5. Modélisation et identifiabilité des systèmes non linéaires.
6. Modélisation et simulation d'un réseau neuronal rythmogène embryonnaire.
7. Chronothérapie anti-cancéreuse.

### 8.1.4 Projet National RNRT

**Participants** : Thierry Grandpierre, Yves Sorel.

Le projet PROMPT (Placement Rapide Optimisé sur Machines Parallèles pour les applications Télécoms) avec Thomson-CSF-Télécommunications, Thomson-CSF-LCR, Simulog et Armines s'est terminé fin 2000. Une proposition de suite à ce projet a été faite dans le cadre Européen du programme ITEA de EUREKA. Il comprend les mêmes partenaires auxquels s'ajoutent Nokia, Tampere University of Technology, Turku University et le LIFL (Laboratoire d'Informatique Fondamentale de Lille).

### 8.1.5 Projet National RNTL

**Participants** : Thierry Grandpierre, Yves Sorel.

Projet national RNTL ACOTRIS sur la spécification en UML, la vérification avec le langage synchrone SIGNAL (projet EPATR de l'INRIA) et l'implantation avec AAA/SynDEX d'applications distribuées temps réel embarquées, avec le CEA, CS-SI et EADS. Une première application de référence d'appariement d'images en temps réel de EADS, à été réalisée avec SynDEX V6.

---

[Cla00] D. CLAUDE (ED.), *Programme de recherche "Automatique, Biologie et Santé : Modélisation et commande de régulations biologiques"*, *ESAIM : Proceedings*, 9, EDP Sciences, Les Ulis, France & Cambridge, USA, 2000, 167 pages.

### 8.1.6 Projet national AEE

**Participant** : Yves Sorel [coordonnateur du comité technique].

Projet national AEE visant à développer une méthodologie de conception d'Architecture Électronique Embarquée pour le domaine des transports. Ce projet réunit les deux principaux constructeurs automobile français PSA et Renault et l'EADS, ainsi que les équipementiers, Sagem, Siemens-AT et Valeo, et les laboratoires IRCCyN et LORIA.

Thierry Grandpierre et Yves Sorel ont participé aux travaux concernant d'une part les techniques de placement/ordonnancement des logiciels (applicatifs et de base) sur un réseau d'ECU (Electronic Control Unit) communicant par le bus CAN, et d'autre part la définition de « composants logiciels standards » et d'une couche logicielle intermédiaire (« middleware ») permettant l'indépendance logiciel/matériel. Sur le premier sujet une extension de AAA/SynDEx a été proposée et utilisée dans le cadre d'un démonstrateur réalisé par les industriels.

Le projet national AEE se terminant en 2001, il a été poursuivi dans le cadre Européen du programme ITEA de EUREKA. Ce projet nommé EAST-EEA a démarré techniquement en juillet 2001. Il comprend les partenaires de AEE sauf SAGEM et EADS, et a comme nouveaux partenaires européens du domaine de l'automobile : Daimler-Chrysler, BMW, FIAT, OPEL, VOLVO, BOSH, Magneti-Marelli, ETAS, VECTOR, Paderborn University.

### 8.1.7 Action de développement AEE

Yves Sorel est responsable de l'action de développement AEE (Architecture Électronique Embarquée) à laquelle participent les projets INRIA : ECOO, EP-ATR, HIPERCOM, MACSI, TICK, PAMPA et SOSSO. Cette action accompagne le projet national AEE.

## 8.2 Actions européennes

### 8.2.1 Projet Européen SAFE

**Participants** : Thierry Grandpierre, Yves Sorel.

Participation au projet sur des AGV (Automatic Guided Vehicle) tolérants aux pannes, utilisés dans les transports publics.

## 8.3 Actions internationales

### 8.3.1 Projet de l'institut Lyapunov

**Participant** : Michel Sorine.

« Gyroscopes vibrants » (1999–2001).  
Coopération avec l'avant-projet MACS. Responsables : D. Chapelle, Y.K. Zhdanov.

### 8.3.2 Convention NSF

**Participants** : Marianne Akian [projet Metalau], Pierre-Alexandre Bliman [responsable de la convention pour l'Inria], Michel Sorine.

Cette convention INRIA-NSF est destinée à financer une coopération avec R. Nussbaum (U. Rutgers) sur les systèmes tout-ou-rien à retards.

### 8.3.3 TMR Nonlinear Control Network, Control Training Site

Nous participons à ces actions européennes en contrôle. En particulier, le projet sera centre d'accueil pour le Control Training Site. P.-A. Bliman coordonne nos participations.

## 8.4 Visites, et invitations de chercheurs

### 8.4.1 Visites, invitations de chercheurs du projet

- Pierre-Alexandre Bliman a donné des séminaires à l'IrCyN (Nantes, Janvier 2001), devant le groupe de travail Systèmes à retards du GDR (Mars 2001), au LAAS (Toulouse, Novembre 2001).

- Catherine Bonnet a séjourné deux semaines au Département de Mathématiques de l'université de Leeds (Grande Bretagne).

F. Clément : - séminaire du projet COMORE, INRIA Sophia-Antipolis, Mai 2001 (Modélisation de la fonction ovarienne sous l'angle de la commande).

- séminaire de l'équipe *Follicule, Ovocyte et Développement*, - UMR INRA - CNRS - Université François Rabelais de Tours - *Physiologie de la Reproduction et des Comportements*, Nouzilly, 05 juin 2001 (Modélisation aux échelles cellulaire et moléculaire du follicule ovarien).

- Atelier Presse INRIA Informatique et Sciences du Vivant, INRIA Rocquencourt, 27 septembre 2001.

### 8.4.2 Visites de chercheurs étrangers

Emilia Fridman (University Tel-Aviv, Israël), Leonid Mirkin (Technion, Haïfa, Israël), Jonathan Partington (Université de Leeds), Panagiotis Tsiotras (Georgia Institute of Technology, Atlanta), Alexander Zhdanov (Institute for System Programming, RAS, Moscou), ont effectué des visites de courte durée dans le projet.

## 9 Diffusion de résultats

### 9.1 Animation de la communauté scientifique

#### Programme de recherche interdisciplinaire « Modélisation et commande des régulations biologiques »

Daniel Claude coordonne ce programme de recherche qui a reçu le soutien du CNRS (GdR Automatique) et de la Direction de la Recherche du MENRT (Actions spécifiques du Département de la physique et des sciences pour l'ingénieur).

## PRC-GDR ISIS

Yves Sorel est responsable du thème « Adéquation Algorithme Architecture » du PRC-GDR ISIS (Information Signal Images et viSion). Il participe au GDR-PRC ARP.

## Groupe de travail « Systèmes à retards »

Pierre-Alexandre Bliman et Catherine Bonnet : participation à ce GdR pour l'ensemble des activités du projet liées au retard (Marianne Akian et M. Sorine sont aussi membres de ce groupe).

## Groupe de travail « Opérateurs fractionnaires et pseudo-différentiels en modélisation, contrôle et signal »

Catherine Bonnet et Michel Sorine font partie de ce groupe de travail. Voir <http://www.laas.fr/gt-opd/>

## Divers

- Catherine Bonnet est membre du conseil d'administration et du bureau de l'association *femmes et mathématiques*. Elle est membre du conseil de la SMF, représentante de la SMF au conseil de la SMAI. Elle est membre de la commission de spécialistes, section 61, université de Perpignan. Elle est médiatrice des doctorants de l'Inria Rocquencourt.
- Daniel Claude est membre du bureau éditorial de la collection *Mathématiques et Applications* de la Société de Mathématiques Appliquées et Industrielles (SMAI), Springer-France. Il est aussi membre du Conseil d'Administration de la Société Francophone de Chronobiologie et Directeur de la Division des Formations de l'UFR des Sciences d'Orsay.
- Yves Sorel fait partie du comité de programme des conférences AAA, GRETSI, SYMPA, RTS.
- Michel Sorine fait partie du comité de programme des JDA2001, de MS4CMS02. Il est président du Comité des projets de l'Unité de Recherche Inria Rocquencourt et membre de la Commission d'évaluation de l'Inria.

## 9.2 Enseignement universitaire

- C. Bonnet assure les PC de Mathématiques 1ère année à l'ENSMP et les PC d'Automatique 2ème année à l'ENSTA.
- D. Claude est responsable de l'enseignement d'Automatique pour les Licence et Maîtrise EEA de l'Université de Paris-Sud (UFR d'Orsay).
- F. Clément intervient dans le module Modélisation biologique et bioinformatique du DEA Informatique Médicale et Technologies de la Communication (Paris 5, Paris 6, Rennes 1).
- Y. Sorel donne les cours suivants :
  - « Spécification, vérification et optimisation des systèmes distribués temps réel embarqués », Ecole d'ingénieurs ESIEE, Noisy-le-Grand ;
  - « Adéquation Algorithme Architecture », DEA Orsay « Systèmes électroniques de traitement

de l'information » ;

« Méthodes pour la réalisation de terminaux portables », Ecole d'ingénieurs ENSTA, Paris.

### Formation permanente

- C. Médigue, A. Monti : formation à l'utilisation du logiciel LARY\_CR.

## 10 Bibliographie

### Ouvrages et articles de référence de l'équipe

- [1] 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.
- [2] M. AKIAN, P.-A. BLIMAN, « On super-high-frequencies in discontinuous 1st-order delay-differential equations », *J. of Differential Equations* 162, 2, 2000, p. 326–358.
- [3] P.-A. BLIMAN, M. SORINE, « Easy-to-use realistic dry friction models for automatic control », *in : Proc. of the 3rd European Control Conference*, Rome, 5-8 Septembre 1995.
- [4] P.-A. BLIMAN, M. SORINE, « A system theoretic approach of systems with hysteresis : Application to friction modelling and compensation », *in : ECC'93, European Control Conference, ECCA*, p. 1844–1849, Groningen, 28 Juin-1 Juillet 1993.
- [5] P.-A. BLIMAN, « Extension of Popov absolute stability criterion to nonautonomous systems with delays », *Int. J. Control* 73, 15, 2000, p. 1362–1374.
- [6] C. BONNET, J.R. PARTINGTON, M. SORINE, « Robust control and tracking of a delay system with discontinuous nonlinearity in the feedback », *Int. J. Control* 72, 15, October 1999, p. 1354–1364.
- [7] C. BONNET, J.R. PARTINGTON, M. SORINE, « Robust stabilization of a delay system with saturating actuator or sensor », *Internat. J. Robust Nonlinear Control* 10, 7, 2000, p. 579–590.
- [8] C. BONNET, J.R. PARTINGTON, « Robust stabilization in the BIBO gap topology », *International Journal of Robust and Nonlinear Control* 7, 1997, p. 429–447.
- [9] C. BONNET, J.R. PARTINGTON, « Bézout factors and  $L^1$ -optimal controllers for delay systems using a two-parameter compensator scheme », *IEEE Trans. on Autom. Control* 44, 08, August 1999, p. 1512–1521.
- [10] C. BONNET, J.R. PARTINGTON, « Coprime factorizations and stability of fractional differential systems », *Systems and Control Letters* 41, 2000, p. 167–174.
- [11] D. CLAUDE, J. CLAIRAMBAULT, « Period shift induction by intermittent stimulation in a *Drosophila* model of PER protein oscillations », *Chronobiology International* 17, 1, 2000.
- [12] F. CLÉMENT, « Optimal control of the cell dynamics in the granulosa of ovulatory follicles », *Math. Biosci.* 152, 1998, p. 123–142.
- [13] S. JASSON, C. MÉDIGUE, P. MAISON-BLANCHE, N. MONTANO, L. MEYER, C. VERMEIREN, P. MANSIER, P. COUMEL, A. MALLIANI, B. SWYNGHEDAUW, « Instant power spectrum analysis of heart rate variability during orthostatic tilt using a time-frequency domain method », *Circulation* 96, 1997, p. 3521–3526.
- [14] M. LANDAU, P. LORENTE, « Conduction block and chaotic dynamics in an asymmetrical model of coupled cardiac cells », *Theoretical Biology* 186/1, 1997, p. 93–105.



- [15] C. LAVARENNE, Y. SOREL, « Performance Optimization of Multiprocessor Real-Time Applications by Graph Transformations », in : *Proc. of Parallel Computing 93 Conference*, Grenoble, September 1993.
- [16] P.-A. BLIMAN, A.M. KRASNOSEL'SKII, M. SORINE, A.A. VLADIMIROV, « Nonlinear Resonance in Systems with Hysteresis », *Nonlinear Analysis, TMA* 27, 5, 1996, p. 561–577.
- [17] P.A. BLIMAN, A.M. KRASNOSEL'SKII, D.I. RACHINSKII, « Sector estimates of nonlinearities and self-oscillation existence in control systems », *Automation and Remote Control* 61, 6, 2000, p. 889–903.
- [18] C. PISSELET, F. CLÉMENT, D. MONNIAUX, « Fraction of proliferating cells in granulosa during terminal follicular development in high and low prolific sheep breeds », *Reprod. Nutr. Dev.* 40, 2000, p. 295–304.
- [19] P.M. NDIAYE, M. SORINE, « Delay sensitivity of quadratic controllers. A singular perturbation approach », *SIAM J. Control Optim.* 38, 6, 2000, p. 1655–1682.
- [20] P.M. NDIAYE, M. SORINE, « Regularity of solutions of retarded equations and application to sensitivity of linear quadratic controllers to small delays », *J. Math. Anal. Appl.* 245, 1, 2000, p. 189–203.
- [21] Y. SOREL, « Massively Parallel Systems with Real Time Constraints : the “Algorithm Architecture Adequation” methodology », in : *Proc. of Massively Parallel Computing Systems, the Challenges of General-Purpose and Special-Purpose Computing Conference*, Ischia Italy, May 1994.

### Livres et monographies

- [22] E. BELHAIRE, E.-B. BOURENNANE, G. BOUVIER, D. DEMIGNY, P. GARDA, L. KESSAL, L. LA-CASSAGNE, F. LOHIER, M. PAINDAVOINE, Y. SOREL, L. TORRES, S. WEBER, *Méthodes et architectures pour le traitement du signal et des images en temps réel, IC2*, Hermes, 2001.

### Thèses et habilitations à diriger des recherches

- [23] R. DJENIDI, *Formalisme de modélisation des systèmes dynamiques hybrides*, thèse de doctorat, Université de Paris 12 Val de Marne, Spécialité Génie informatique, automatique et traitement du signal, 02/07/2001.
- [24] N. VENOT, *Modélisation et commande de groupes moto-propulseurs à basse consommation : exemples de problèmes d'automatique des systèmes hybrides*, thèse de doctorat, Université de Paris 9 Dauphine, Spécialité Mathématique et automatique, 03/12/2001.

### Articles et chapitres de livre

- [25] M. AKIAN, P.-A. BLIMAN, M. SORINE, « Control of delay systems with relay », *IMA Journal on Mathematical Control and Information, Special issue on analysis and design of delay and propagation systems*, à paraître.
- [26] P.-A. BLIMAN, « Lyapunov equation for the stability of 2-D systems », *Multidimensional Systems and Signal Processing*, à paraître.
- [27] P.-A. BLIMAN, « Lyapunov-Krasovskii functionals and frequency domain : delay-independent absolute stability criteria for delay systems », *International Journal of Robust and Nonlinear Control*, à paraître.

- [28] P.-A. BLIMAN, « Stability of nonlinear delay systems : delay-independent small gain theorem and frequency domain interpretation of the Lyapunov-Krasovskii method », *International Journal of Control*, à paraître.
- [29] P.-A. BLIMAN, « LMI characterization of the strong delay-independent stability of delay systems via quadratic Lyapunov-Krasovskii functionals », *Systems and Control Letters* 43, 4, 2001, p. 263–274.
- [30] C. BONNET, J. PARTINGTON, « Stabilization of fractional exponential systems including delays », *Kybernetika* 37, 3, 2001, p. 345–353.
- [31] C. BONNET, « Stabilité des équations différentielles linéaires à retard et fractionnaires », *Femmes et mathématiques*, 6, 2001.
- [32] F. CLÉMENT, D. MONNIAUX, J. STARK, K. HARDY, J.-C. THALABARD, S. FRANKS, D. CLAUDE, « Mathematical model of FSH-induced cAMP production in ovarian follicles », *Am. J. Physiol. (Endocrinol. Metab.)* 281, 2001, p. E35–E53.
- [33] F. CLÉMENT, D. MONNIAUX, J.-C. THALABARD, D. CLAUDE, « Contribution of a mathematical modelling approach to the understanding of ovarian function », *C. R. Acad. Sci. Paris, Sér. III*, à paraître.
- [34] P. ESCOURROU, H. NEDELCOUX, A. MONTI, C. MÉDIGUE, « Syndrome d'apnées obstructives du sommeil et insuffisance cardiaque », *Revue Neurol.* 157 :11 Pt 2, 2001, p. 5S38–5S41.
- [35] M. LANDAU, A. BARDOU, « Arrhythmias in a system of coupled depolarized and normal ventricular cells », *Biophysical Journal* 80, 1, January 2001.
- [36] L. MANGIN, A. MONTI, C. MÉDIGUE, « Cardiorespiratory system dynamics in chronic heart failure », *European Journal of Heart Failure*, à paraître.
- [37] L. MANGIN, A. MONTI, C. MÉDIGUE, I. MACQUIN-MAVIER, M. LOPEZ, P. GUERET, A. CASTAIGNE, J. BESTEL, C. BAILLARD, B. SWYNGHEDAUW, P. MANSIER, « Altered baroreflex gain during voluntary breathing in chronic heart failure », *European Journal of Heart Failure* 3, 2, 2001, p. 189–195.
- [38] C. MÉDIGUE, A. GIRARD, D. LAUDE, A. MONTI, M. WARGON, J. ELGHOZI, « Relation between pulse interval and respiratory sinus arrhythmia : a time- and frequency-domain analysis of the effects of atropine », *Pflügers Archiv European Journal of Physiology*, 441, 2001, p. 650–655.

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

- [39] M. AKIAN, F. CLÉMENT, « Commande d'un système simple avec sortie discontinue retardée. Lien avec la régulation de la pression artérielle », in : *Quatrième Journée du groupe thématique Systèmes à retards*, Paris, Avril 2001.
- [40] N. AYACHE, D. CHAPELLE, F. CLÉMENT, Y. COUDIÈRE, H. DELINGETTE, J.-A. DÉSIDÉRI, M. SERMESANT, M. SORINE, J. URQUIZA, « Towards model-based estimation of the cardiac electro-mechanical activity from ECG signals and ultrasound images », in : *Functional Imaging and Modeling of the Heart (FIMH 2001)*, Helsinki, Novembre 2001.
- [41] J. BESTEL, F. CLÉMENT, M. SORINE, « A biomechanical model of muscle contraction », in : *Fourth International Conference on Medical Image Computing and Computer-Assisted Intervention, (MICCAI 2001)*, Utrecht, Octobre 2001.
- [42] P.-A. BLIMAN, « Bounded-real lemma for 2-D systems. Application to the analysis of delay-independent  $H_\infty$  performance of delay systems », in : *Proc. 5th IFAC Symposium "Nonlinear Control Systems" NOLCOS*, St.Petersburg (Russia), July 2001.

- [43] P.-A. BLIMAN, « Delay-independent circle criterion and Popov criterion », in : *Proc. of 3rd IFAC Workshop on Time Delay Systems*, Santa Fe (New Mexico), December 2001.
- [44] P.-A. BLIMAN, « Delay-independent small gain theorem and frequency domain interpretation of the Lyapunov-Krasovskii method for stability of nonlinear delay systems », in : *Proc. of 6th European Control Conf.*, Porto (Portugal), September 2001.
- [45] P.-A. BLIMAN, « LMI approach to spectral stabilizability of linear delay systems, and stabilizability of linear systems with complex parameter », in : *Proc. of 40th IEEE CDC*, Orlando (Florida), December 2001.
- [46] P.-A. BLIMAN, « A Lyapunov equation equivalent to internal stability of 2-D systems », in : *Proc. of 1st IFAC Symposium on System Structure and Control*, Prague (Czech Republic), August 2001.
- [47] P.-A. BLIMAN, « Nonconservative LMI criteria for delay-independent stability of delay systems, based on quadratic Lyapunov-Krasovskii functionals », in : *Proc. of 40th IEEE CDC*, Orlando (Florida), December 2001.
- [48] P.-A. BLIMAN, « Solvability of a Lyapunov equation for characterization of asymptotic stability of linear delay systems », in : *Proc. of 6th European Control Conf.*, Porto (Portugal), September 2001.
- [49] P.-A. BLIMAN, « Stability criteria for delay systems with sector-bounded nonlinearities », in : *Proc. of American Control Conference*, Arlington, June 2001.
- [50] C. BONNET, « Contrôle robuste d'une classe étendue de systèmes pseudo-différentiels », in : *GDT Opérateurs fractionnaires et pseudo-différentiels*, LAAS, Toulouse, 24-25 avril 2001.
- [51] C. BONNET, « Stabilisation des systèmes fractionnaires à retards », in : *Journées Nationales d'Automatique*, Autrans, 31 janv - 2 fev 2001.
- [52] C. BONNET, « Stabilization, nuclearity and realization of various fractional systems », in : *Pluralism in Distributed Parameter Systems Workshop*, Twente, The Netherlands, 2-6 July 2001.
- [53] D. CHAPELLE, F. CLÉMENT, F. GÉNOT, P. L. TALLEC, M. SORINE, J. URQUIZA, « A Physiologically-Based Model for the Active Cardiac Muscle Contraction », in : *Functional Imaging and Modeling of the Heart (FIMH 2001)*, Helsinki, Novembre 2001.
- [54] F. CLÉMENT, « Approche système de la fonction cardio-respiratoire », in : *Journées Nationales d'Automatique*, Autrans, 31 janv - 2 fev 2001.
- [55] C. DIMA, A. GIRAULT, C. LAVARENNE, Y. SOREL, « Off-Line Real-Time Fault-Tolerant Scheduling », in : *Euromicro Workshop on Parallel and Distributed Processing*, p. 410-417, Mantova, Italy, February 2001.
- [56] P. EMERY, F. MAROTEAUX, M. SORINE, « Modélisation simplifiée des moteurs essence à injection directe par réduction des modèles physiques multidimensionnels », in : *Colloque Combustion Propre, Orléans*, 6-8 Juin 2001.
- [57] A. GIRAULT, C. LAVARENNE, M. SIGHIREANU, Y. SOREL, « Fault-Tolerant Static Scheduling for Real-Time Distributed Embedded Systems », in : *21st International Conference on Distributed Computing Systems, ICDCS'01*, Phoenix, USA, April 2001.
- [58] A. GIRAULT, C. LAVARENNE, M. SIGHIREANU, Y. SOREL, « Generation of Fault-Tolerant Static Scheduling for Real-Time Distributed Embedded Systems with Multi-Point Links », in : *IEEE Workshop on Fault-Tolerant Parallel and Distributed Systems*, San Francisco, USA, April 2001.
- [59] M. LANDAU, A. BARDOU, « Arrhythmias in a system of coupled depolarized and normal ventricular cells », in : *Biophysical Society 45th annual Meeting*, Boston, 2001.

- [60] M. LANDAU, A. BARDOU, « Unidirectional blocks and ectopic foci », *in : 23 rd Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society*, Istanbul, 2001.
- [61] P.-A. BLIMAN, S.I. NICULESCU, « A note on frequency domain interpretation of Lyapunov-Krasovskii method in control of linear delay systems », *in : Proc. of American Control Conference*, Arlington, Virginia, June 2001.
- [62] M. SORINE, « Modèle différentiel de la contraction musculaire contrôlée et nanomoteurs à combustion », *in : Journées Nationales d'Automatique*, Autrans, 31 janv - 2 fev 2001.
- [63] M. SORINE, « Modélisation, simulation et autres techniques appliquées à l'étude du système cardiovasculaire », *in : Modélisation*, Mines de Paris, Paris, 29 mars 2001.
- [64] M. SORINE, « Sur une classe d'opérateurs d'hysteresis pseudo-différentiels : point de vue de la théorie des systèmes et applications », *in : GDT Opérateurs fractionnaires et pseudo-différentiels*, LAAS, Toulouse, 24-25 avril 2001.
- [65] M. SORINE, « Towards Model-Based Estimation of the Cardiac Electro-Mechanical Activity from ECG Signals and 3D images », *in : 1st International Workshop on Cardiac Modeling in Arrhythmogenic Right Ventricular Dysplasia*, CEA, Paris, 7 november 2001.

### Rapports de recherche et publications internes

- [66] P.-A. BLIMAN, « Lyapunov equation for the stability of linear delay systems of retarded and neutral type », *Rapport de Recherche n°4127*, Inria, Rocquencourt, March 2001, <http://www.inria.fr/rrrt/rr-4127.html>.
- [67] R. DJENIDI, R. NIKOUKHAH, S. STEER, Y. SOREL, « Interface Scicos-SynDEX », *Rapport de recherche n°4250*, INRIA, septembre 2001, <http://www.inria.fr/rrrt/rr-4250.html>.

### Divers

- [68] C. BONNET, J.R. PARTINGTON, M. SORINE, « A vectorial Matching Pursuit algorithm applied to the analysis of Vecto-cardiogram data », 2001, article en révision.
- [69] C. BONNET, J.R. PARTINGTON, « Analysis of fractional delay systems of retarded and neutral type », 2001, article révisé.
- [70] M. LANDAU, A. BARDOU, « A unified approach of reentry and ectopic foci phenomena in coupled ventricular cells », soumis.
- [71] A. MONTI, C. MÉDIGUE, H. NEDELCOUX, P. ESCOURROU, « Cardiovascular autonomic control during sleep in normal subjects », soumis.