

# *Projet SOSSO*

*Applications et Outils de l'Automatique*

*Rocquencourt*

THÈME 4A

*R* *apport*  
*d'Activité*

2000



## 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>6</b>
2.1	Thèmes de recherche du projet . . . . .	6
<b>3</b>	<b>Fondements scientifiques</b>	<b>8</b>
3.1	Modélisation des systèmes à hystérésis . . . . .	8
3.1.1	Une classe de modèles d'hystérésis «rate independent» . . . . .	8
3.1.2	Quelques applications des modèles d'hystérésis . . . . .	11
3.2	Analyse et commande de systèmes à hystérésis ou à retards . . . . .	12
3.2.1	Comportement qualitatif de systèmes non linéaires. Problèmes de stabilité et d'oscillations . . . . .	12
3.2.2	Commande robuste de systèmes à retards . . . . .	14
3.3	Modélisation et commande de systèmes physiologiques. . . . .	18
3.3.1	Modélisation mécanique du myocarde. . . . .	18
3.3.2	Analyse et modélisation du système cardio-respiratoire et de ses mécanismes de régulation . . . . .	20
3.3.3	Modélisation d'activités rythmiques d'origine centrale. . . . .	20
3.3.4	La fonction de reproduction vue sous l'angle de la commande . . . . .	21
3.3.5	Modélisation et commande pharmacologique de systèmes physiologiques altérés. . . . .	22
3.4	Méthode d'«Adéquation Algorithme Architecture» . . . . .	23
3.4.1	Contexte et objectifs . . . . .	23
3.4.2	Modèle d'algorithme . . . . .	24
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» . . . . .	28
3.4.7	Tolérance aux pannes . . . . .	29
<b>4</b>	<b>Domaines d'applications</b>	<b>29</b>
4.1	Panorama . . . . .	29
4.2	Automatique, Informatique et Automobile . . . . .	30
4.2.1	Les thèmes de l'accord Inria-Renault en électronique embarquée dans l'automobile . . . . .	30
4.2.2	Les sujets de recherche . . . . .	31
4.3	Automatique, Traitement du signal et Sciences biomédicales . . . . .	31
4.3.1	Analyse et modélisation du système cardio-respiratoire et de ses mécanismes de régulation . . . . .	31
4.3.2	La fonction de reproduction vue sous l'angle de la commande . . . . .	34
4.3.3	Commande chronopharmacologique en clinique: applications en bactériologie et en cancérologie . . . . .	35

4.4	Systèmes embarqués pour la commande et le traitement du signal et des images	35
<b>5</b>	<b>Logiciels</b>	<b>36</b>
5.1	LARY_CR, logiciel d'analyse des rythmes cardio-respiratoires	36
5.2	SynDEX, logiciel d'aide à l'implantation d'applications temps réel embarquées	36
<b>6</b>	<b>Résultats nouveaux</b>	<b>36</b>
6.1	Stabilité et comportement qualitatif des systèmes non linéaires	36
6.2	Modélisation et commande des systèmes à retards ou à hystérésis	37
6.2.1	Commande de systèmes à retard avec sortie tout-ou-rien	38
6.2.2	Stabilisation robuste des systèmes exponentiels fractionnaires à retards	38
6.2.3	Une classe d'opérateurs d'hystérésis pseudo-différentiels	39
6.3	Automatique, Traitement du signal et Sciences biomédicales.	40
6.3.1	Modélisation en électrophysiologie cardiaque	40
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	45
6.3.5	Analyse de VCG à l'aide de l'algorithme de «Matching Pursuit»	46
6.3.6	Modélisation et commande de la fonction ovarienne	46
6.4	Méthode d'«Adéquation Algorithme Architecture»	47
<b>7</b>	<b>Contrats industriels (nationaux, européens et internationaux)</b>	<b>51</b>
7.1	Modélisation de la pollution et de la consommation de moteurs essence	51
7.2	Exemples de problèmes d'automatique des systèmes hybrides : modélisation, optimisation et commande de divers groupes motopropulseurs	52
7.3	Application des modèles de frottements secs à la caractérisation de suspensions à lames pour poids-lourds	52
7.4	Modélisation réduite pour la commande d'une Pile à Combustible	53
7.5	Action de développement LaRA	54
7.6	Thomson-CSF-Télécommunications, Thomson-CSF-LCR, Simulog	54
7.7	Contrat Synopsis-Castor	54
<b>8</b>	<b>Actions régionales, nationales et internationales</b>	<b>54</b>
8.1	Actions nationales	54
8.1.1	Actions de recherche coopératives Inria	54
8.1.2	Programme de recherche interdisciplinaire «Modélisation et commande des régulations biologiques»	55
8.1.3	Projet National RNRT	55
8.1.4	Projet National RNTL	55
8.1.5	Projet national AEE	55
8.1.6	Action de développement AEE	56
8.2	Actions européennes	56
8.2.1	Projet Européen SAFE	56
8.3	Actions internationales	56

---

8.3.1	Projet de l'institut Lyapounov . . . . .	56
8.3.2	Convention NSF . . . . .	56
8.4	Visites, et invitations de chercheurs . . . . .	56
8.4.1	Visites, invitations de chercheurs du projet . . . . .	56
8.4.2	Visites de chercheurs étrangers . . . . .	57
<b>9</b>	<b>Diffusion de résultats</b>	<b>57</b>
9.1	Animation de la communauté scientifique . . . . .	57
9.2	Enseignement universitaire . . . . .	58
9.3	Participation à des colloques, séminaires, invitations . . . . .	58
<b>10</b>	<b>Bibliographie</b>	<b>58</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]

Frédérique Clément [CR]

Claire Médigue [IE]

### Collaborateurs extérieurs

Jean Clairambault [PRAG à l'Université Paris VIII, St Denis]

Daniel Claude [Professeur, Université d'Orsay]

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

Alexandre M. Krasnosel'skii [Université de Moscou]

Jonathan Partington [Université de Leeds]

Panagiotis Tsiotras [Georgia Institute of Technology, Atlanta]

**Chercheurs post-doctorants**

Sophie Bismuth [jusqu'à février 2000]

Catalin Dima [ARC TOLERE]

Rémy Kocik [Action de Développement AEE depuis avril 2000]

José Urquiza [co-encadrement MACS, ARC ICEMA depuis octobre 2000]

Antoine Viel [depuis octobre 2000]

**Ingénieur expert**

Christophe Lavarenne [jusqu'au 31/03/2000]

**Doctorants**

Julie Bestel [bourse Inria, Université de Paris-Dauphine]

Arnaud Clavel [Cifre Renault, co-encadrement Sigma2]

Ailton Dias [bourse du gouvernement Brésilien, co-encadrement Esiee, Université d'Orsay]

Rachid Djenidi [Éducation Nationale, co-encadrement Metalau, Université de Créteil]

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

Thierry Grandpierre [bourse MENRT, Université d'Orsay]

Rémy Kocik [bourse Inria, Université de Rouen jusqu'au 22/03/2000]

Nathalie Méaupe [Cifre Renault, Université de Paris-Dauphine]

Alessandro Monti [bourse MENRT, Université d'Orsay]

**Stagiaires**

Karim Bencherif [DEA d'automatique, Université d'Orsay]

Fabien Fleutot [ESIEE Noisy-Le-Grand]

Sébastien Le Nours [DEA électronique, U. de Lille I]

## 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, transports, prototypage rapide des systèmes de contrôle-commande ou traitement du signal, co-design matériel-logiciel, CAO système, langage synchrone, multiprocesseur, parallèle, distribué, temps réel, embarqué.

### 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 synchron». 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 Sorrel 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) communiquant par des bus ou des liens point-à-point. 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>[BS96]</sup>. Il a été utilisé pour l'étude du contact pneu/sol.

---

[BS96] 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>[LL97]</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>[BS93]</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,

- 
- [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.
- [LL97] 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.
- [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.
- [BS93] 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.

d'une équation d'état et d'une équation de sortie :

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>[BS95]</sup>.

---

[BS95] 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 :

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

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>[BS96]</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-

---

[BS96] 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 élastoplastiques modélisables avec les modèles précédents, voir section 3.3.1 le modèle (9) et section 6.3.2 le modèle (11). 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 «dithe», 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>[BS95]</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>[ABS97]</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>[BAS95]</sup>, stabilité des cycles, résonance paramétrique<sup>[BASA96]</sup>, observabilité...

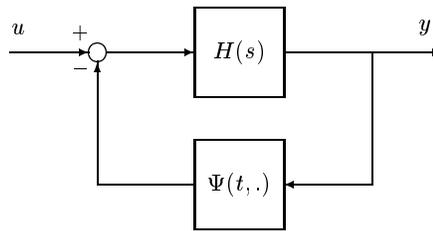


FIG. 1 – *Système semi-linéaire*

$H$  est un opérateur linéaire, comportant éventuellement des retards,  $\psi$  une non-linéarité

- 
- [BS95] 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.
- [ABS97] K. AOUCHE, 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.
- [BAS95] P.-A. BLIMAN, A.M. KRASNOSEL'SKII, M. SORINE, «Dither in systems with hysteresis», *rapport de recherche n° 2690*, Inria, 1995.
- [BASA96] 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.

éventuellement partiellement hystérétique,  $u$  représente les entrées commandées, mais aussi les bruits. Par exemple, le modèle (6) du pot catalytique est de ce type :

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

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* :

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  $r$

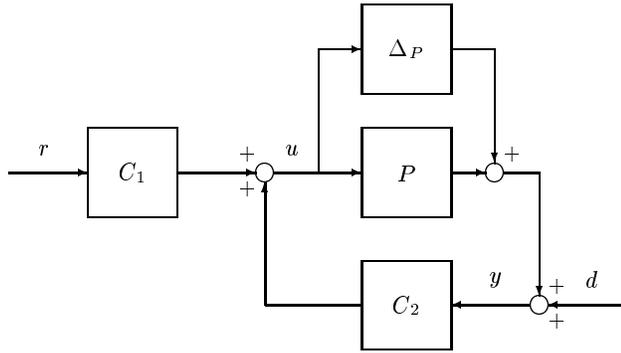


FIG. 2 – Implémentation idéalisée d'un contrôleur à deux degrés de liberté  $C_1, C_2$ .

est 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

---

*Feedback control, nonlinear systems, and complexity*, Springer (éditeur), *Lecture Notes in Control and Inform. Sci.*, 202, p. 88–98, 1995.

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

factorisation coprime  $(N, D)$  sur  $\hat{\mathcal{A}}(0)$  :

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

Nous avons déterminé [6] 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  $y - r = -(I - NU)r + (Y + NQ)Dd$ , 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

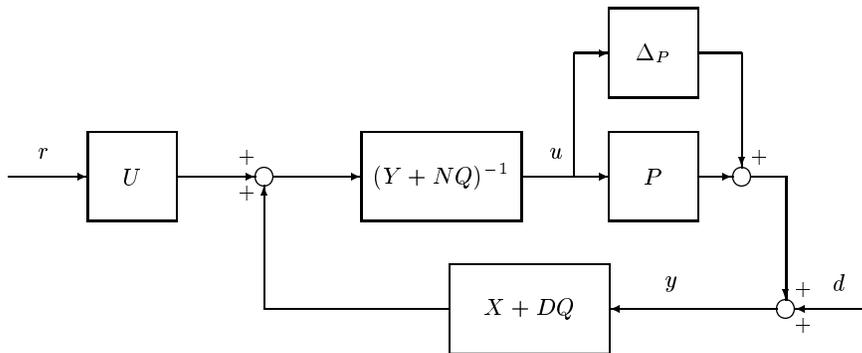


FIG. 3 – Implémentation réaliste d'un contrôleur à deux degrés de liberté  $U, Q$ .

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

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

$P$ ,

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

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

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 [25].

Dans le deuxième cas nous avons repris un schéma de contrôleur à deux degrés de liberté [4, 25]. 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

- 
- [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.

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 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** : Julie Bestel, 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** : Julie Bestel, 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, plutôt qu'à celle de la cellule, tout en étant compatibles avec les connaissances sur les comportements qualitatifs au niveau de la cellule ou du muscle entier. Cela a conduit à un problème de prise en compte de phénomènes intervenant depuis l'échelle du sarcomère (le micromètre : 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 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 glisser

---

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

les uns par rapport aux autres 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 essayé d'obtenir 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** : Julie Bestel, 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 <sup>[CF97,F<sup>+</sup>95,M96]</sup>. Au cours du développement, la

- 
- [CF97] J. CHAMPAGNAT, G. FORTIN, « Primordial respiratory like rhythm generation in the vertebrate embryo. », *Trends Neurosciences* 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.
- [M96] A. L. MÉTAYER, « Activité rythmique primordiale dans le tronc cérébral isolé embryonnaire de

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 folliculogenèse, 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) ovocytes 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 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 :** Thierry Grandpierre, Rémy Kocik, Christophe Lavarenne, 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. La méthodologie AAA est fondée sur un modèle unifié de graphes factorisés, autant pour spécifier l'Algorithme et l'Architecture multicomposant, que pour déduire les implantations possibles en termes de transformations de graphes. L'Adéquation est un problème d'optimisation qui consiste à choisir une implantation dont les performances, déduites des caractéristiques des composants, respectent les contraintes temps réel et d'embarquabilité. Cette approche permet de générer automatiquement d'une part les exécutifs distribués temps réel pour les composants processeurs, et d'autre part les «net-list» pour les composants circuits, supportant ensemble («co-design») l'exécution 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 «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 périodicité), 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 conduisant 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

---

[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.

électromagnétiques, l'architecture doit souvent être *multicomposant* (parallèle, répartie, distribuée) composée de plusieurs processeurs et de circuits spécialisés (ASIC<sup>1</sup> figé ou FPGA<sup>2</sup> reconfigurable, plus lourds à mettre en œuvre mais plus performants).

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, autant des prototypes que des «produits de série» dérivés de ces prototypes. Afin d'éviter toute rupture entre les différentes phases du cycles 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 l'implantation, à l'aide d'un modèle unifié de *graphe factorisé*. L'intérêt principal de ce modèle réside dans sa capacité à exprimer tout le parallélisme, concrètement décrit sous la forme de schémas-blocs, non seulement dans le cas de l'algorithme (graphe flot de données : exemple Simulink) et de l'architecture (interconnexion de composants : exemple VHDL structurel), mais aussi dans le cas de l'implantation de l'algorithme sur l'architecture (distribution et ordonnancement des calculs et des communications). Il permet d'effectuer des optimisations précises prenant en compte la conception conjointe logiciel/matériel («co-design») et de simplifier la génération de code (exécutifs le plus statique possible et/ou «net-list»).

### 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 disponible dans les 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. Pour cela notre modèle d'algorithme est un *graphe de dépendances factorisé* : c'est un hypergraphe orienté acyclique (DAG) [SH86], dont les sommets sont des *opérations* partiellement ordonnées [Pra86] (parallélisme potentiel) par leurs dépendances de 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'exécution n'a lieu que lorsque la dépendance porte une valeur particulière, booléenne ou même entière). 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. L'algorithme est donc modélisé par un

- 
1. ASIC : Application Specific Integrated Circuit
  2. 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.

graphe de dépendances, infiniment large mais répétitif, réduit par factorisation à son motif répétitif [LS97], généralement appelé *graphe flot de données*. De plus, chaque partie répétitive du graphe flot de données («mid de boucles», répétitions finies) est aussi réduite par factorisation à son motif répétitif. 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») [Hal93] qui présentent l'intérêt de faire des vérifications formelles en termes d'ordre sur les événements.

### 3.4.3 Modèle d'architecture

Les modèles les plus classiquement utilisés pour spécifier des architectures parallèles ou distribuées sont les PRAM («Parallel Random Access Machines») et les DRAM («Distributed Random Access Machines») [Zom96]. Le premier modèle correspond à un ensemble de processeurs communicant par mémoire partagée alors que le second correspond à un ensemble de processeurs à mémoire distribuée communicant 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 communication inter-processeurs qui sont souvent critiques pour les performances temps réel.

Pour cela notre modèle d'*architecture multicomposant* hétérogène est un graphe non 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 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

- 
- [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.
- [Zom96] A. ZOMAYA, *Parallel and distributed computing handbook*, McGraw-Hill, 1996.
- [Gec86] F. GECSEG, *Products of automata*, *EATCS Monographs on Theoretical Computer Science*, Springer-Verlag, 1986.

avoir chacun des caractéristiques différentes (par exemple durée d'exécution des opérations et 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).

En termes de conception d'architecture de circuit intégré, notre modèle d'architecture est une extension du modèle classique RTL («Register Transfer Level», niveau transfert de registres) [MC80], que nous qualifions de *Macro-RTL*. Une opération du graphe de l'algorithme correspond à une *macro-instruction* (une séquence d'instructions ou 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

Une *implantation* d'un algorithme sur une architecture 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 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* (données 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. L'ordonnement consiste à linéariser (rendre total) l'ordre par-

---

[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.

tiel 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 précédence 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 donnés 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]. Chacune de ces implantations possibles a des performances (latence, cadence) différentes. Ces performances sont obtenues par calcul de chemin critique (latence) et de boucle critique (cadence) 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.

### 3.4.5 Implantation optimisée : adéquation

La recherche d'une implantation optimisée tenant compte de contraintes temps-réel et d'embarquabilité correspond à une adéquation (mise en correspondance efficace) entre un algorithme et une 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 composants 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 au-

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

tomatisé 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-complet, 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 qui s'exécutent très rapidement [LC93].

Les heuristiques que nous avons développées sont de type «dist-scheduling» améliorées pour prendre en compte les communications inter-opérateurs (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), l'hétérogénéité des opérateurs, des communicateurs, des bus/mux/démux/arbitre et des mémoires, et enfin le conditionnement des opérations. Ces heuristiques gloutonnes sont ensuite étendues à des heuristiques itératives de voisinage local, beaucoup plus lentes mais donnant des résultats plus précis.

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

Un *exécutif* pour processeur [GLS98], comme une «net-list» pour circuit, est un codage d'une implantation suivant le modèle macro-RTL de l'architecture. La séquence d'opérations sur chaque opérateur est codée par une séquence de macro-instructions ; sur un circuit les macro-instructions sont des composants de bibliothèque VHDL, connectés en pipeline. Les dépendances d'ordonnancement, qui ne sont nécessaires que pour les processeurs, sont implicites dans l'ordre de codage. Chaque dépendance de donnée est codée par un macro-registre passé en argument d'une part à la macro-instruction productrice (à l'origine de la dépendance) et d'autre part aux macro-instructions consommatrices (aux extrémités de la dépendance). L'alternance d'accès à un macro-registre (précédence écriture-lectures intra-itération, et précédence lectures-écriture inter-itération), si elle est trivialement respectée par la mise en séquence sur un même processeur des macro-instructions dépendantes, doit être imposée par l'intermédiaire de macro-instructions de synchronisation lorsque les macro-instructions dépendantes sont exécutées par des opérateurs différents, ce qui est toujours le cas des circuits. 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.

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 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

- 
- [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.
- [GLS98] T. GRANDPIERRE, C. LAVARENNE, Y. SOREL, «Modèle d'exécutif distribué temps réel pour SynDEx», *Rapport de Recherche n° 3476*, INRIA, august 1998.

*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 et 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 sous-traité pour nous par les compilateurs des langages synchrones qui produisent une spécification d'algorithme vérifiée, le second demande d'accroître la spécification de l'algorithme et de l'architecture pour assurer que si des pannes surviennent malgré tout lors du fonctionnement temps réel, le comportement de l'application reste correct jusqu'à un certain point au delà duquel un fonctionnement dégradé sera inévitable.

## 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'adhérence).*

*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 distri-*

bué 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-délai (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, archi-**

**tecture 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 fiabilisés.

### 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 :** Julie Bestel, 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 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

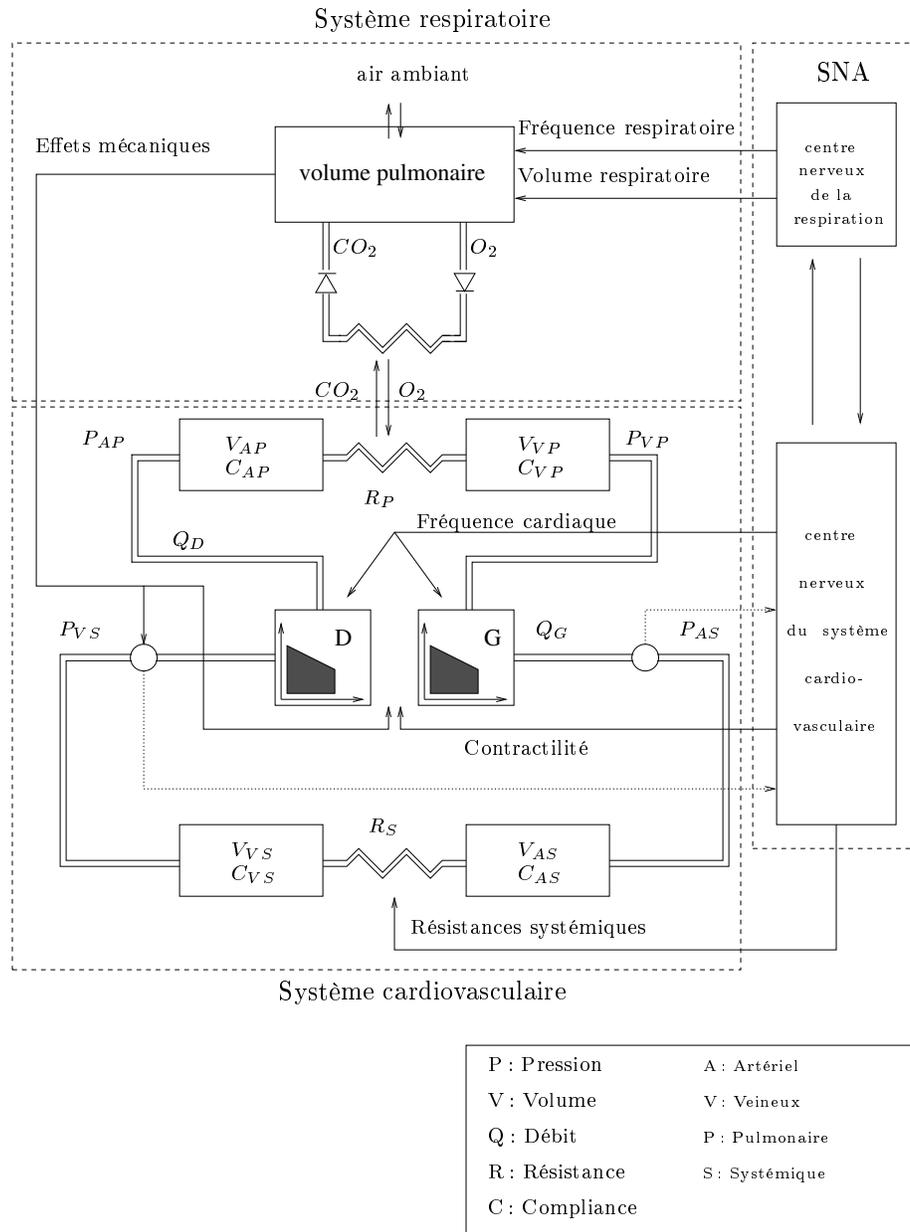


FIG. 4 – Modèle du système cardio-respiratoire.

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.

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 [36]. 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 poly-kystiques, 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.

---

[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 modelling», *Cell Prolif.* 30, 1997, p. 255–270.

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 et [30]).

#### 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. Cette action est menée en collaboration avec le service pharmaceutique de l'Hôpital Antoine-Charial (Hospices Civils de Lyon) et avec le Laboratoire «Rythmes biologiques et Chronothérapie» de l'Institut du Cancer et d'Immunogénétique (Hôpital Paul-Brousse, Villejuif).

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

**Participants :** Thierry Grandpierre, Rémy Kocik, Christophe Lavarenne, 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 futurs systèmes de commande d'organes à travers un réseau informatique, offre un bel exemple de co-design de système d'automatique embarqué. Le domaine des télécommunications avec l'avènement des SOC (System On a Chip) pose aussi des problèmes de co-design de systèmes complexes de traitement du signal et des images. La méthodologie AAA est utilisée dans l'action LaRA (post-Praxitèle) pour réaliser la commande d'un véhicule électrique semi-autonome comprenant un bus CAN reliant plusieurs microcontrôleurs, et dans le projet RNRT PROMPT pour programmer des multi-SOCs.

## 5 Logiciels

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

**Participants :** Julie Bestel, 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 contrôlés 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

**Participants :** Christophe Lavarenne, 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 . . .). VHDL . . .). 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 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/syndex>).

#### Diffusion de SynDEx

La version 5.1, avec générateur d'exécuteur pour architectures cibles hétérogènes et noyau d'exécuteur pour réseau de stations de travail sous C-UNIX-TCP/IP, est maintenant téléchargeable gratuitement et librement sur le Web à l'URL : <http://www-rocq.inria.fr/syndex>.

## 6 Résultats nouveaux

### 6.1 Stabilité et comportement qualitatif des systèmes non linéaires

**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** : système de Lure, oscillation non linéaire, solution périodique, critère de stabilité de Popov.

Nous avons continué l'étude de la stabilité des systèmes à retard avec non-linéarités vérifiant une condition de secteur (stabilité absolue des systèmes à retards). Un critère de stabilité indépendant du retard avait précédemment été obtenu, utilisant une classe bien connue de fonctionnelles de Lyapunov-Krasovskii quadratiques, paramétrée par deux matrices définies positives (au lieu d'une dans le cas sans retard). Ce critère, analogue «*delay-independent*» du critère du cercle, se présente sous la forme d'une inégalité matricielle linéaire (*linear matrix inequalities* en anglais, abrégées en *LMI*). L'approche a été généralisée, conduisant à d'autres résultats du même type (stabilité absolue des systèmes à plusieurs retards, critère de Popov «*delay-independent*», résultats «*delay-dependent*», assurant la stabilité absolue pour toute valeur du retard dans un intervalle borné prescrit de nombres positifs). D'autre part, on a montré, en interprétant les résultats précédents au moyen d'outils d'analyse de la robustesse (valeurs singulières structurées), que la classe de fonctionnelles de Lyapunov-Krasovskii utilisées conduit à des résultats conservatifs par rapport aux versions indépendantes du retard des résultats de stabilité absolue (critère du cercle, critère de Popov).

Les travaux précédents ont également permis d'obtenir un critère LMI non-conservatif de stabilité indépendante du retard. Ceci fournit un équivalent à une propriété bien connue pour les systèmes rationnels, pour lesquels la stabilité asymptotique est équivalente à la solvabilité de l'équation de Lyapunov associée, obtenue en cherchant une fonction de Lyapunov quadratique.

## 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, commencé l'étude de retards fractionnaires.*

**Participants** : Marianne Akian, Sophie Bismuth, 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, Sophie Bismuth, 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 à retards

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

La stabilisation robuste des systèmes exponentiels fractionnaires (dont la fonction de trans-

fert est du type  $P(s) = \frac{q_0(s) + \sum_{i=1}^{i=\tilde{n}_2} \tilde{q}_i(s)e^{-\beta_i s^r}}{p_0(s) + \sum_{i=1}^{i=\tilde{n}_1} \tilde{p}_i(s)e^{-\gamma_i s^r}}$ ) a été considérée dans [26]. Les techniques

développées dans cette étude ne permettaient pas l'analyse du cas limite  $r = 1$  correspondant à des retards. Nous l'avons traité cette année, généralisant certains résultats qu'avait obtenu Hotzel [Hot98] avec des méthodes temporelles (*i.e.* méthodes d'analyse du comportement de la réponse impulsionnelle).

Les fonctions de transfert les plus générales étudiées sont celles de la forme:

---

[Hot98] R. HOTZEL, « Some stability conditions for fractional delay systems », *Journal of Mathematical Systems, Estimation, and Control* 8, 4, 1998, p. 1–19.

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

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  $b_k \geq 0$ .

Nous avons supposé bien sûr que les  $u_i$  et  $v_i$  n'étaient pas de la forme  $\alpha s$  c'est-à-dire, n'étaient pas des polynômes standards de degré un.

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

Pour la sous-classe des systèmes (fractionnaires exponentiels à retards) retardés (*i.e* ceux vérifiant  $\deg p_0 > \deg p_i$  pour  $i = 1, \dots, n_1$  et  $\deg p_0 > \deg q_i$  pour  $i = 0, \dots, n_2$ ), nous avons prouvé qu'une condition nécessaire et suffisante de BIBO-stabilité était encore que  $P$  n'ait pas de pôles dans  $\{s \in \mathbf{C} : \operatorname{Re} s \geq 0\}$ .

La condition suffisante de stabilité obtenue pour les systèmes (fractionnaires exponentiels à retards) neutres (*i.e* ceux 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  $i = 0, \dots, n_2$ ) généralise celle des systèmes (fractionnaires) à retards : il existe  $a < 0$  tel que  $P$  n'ait pas de pôles dans  $(\mathbf{C} \setminus \mathbf{R}_-) \cap \{\operatorname{Re} s > a\} \cup \{0\}$ .

Cette analyse de la BIBO-stabilité a ensuite permis la détermination de factorisations coprimales et facteurs de Bézout dans le cas de systèmes retardés (rappelons que le problème est encore ouvert pour des systèmes à retards neutres standards).

Nous avons également donné quelques propriétés concernant la localisation des pôles ou la nucléarité de ces systèmes dans des cas particuliers.

Nous considérons à présent la possibilité de réaliser de tels systèmes au moyen par exemple des réalisations diffusives introduites par G. Montseny <sup>[Mon98]</sup> et D. Matignon <sup>[Mat98]</sup>.

### 6.2.3 Une classe d'opérateurs d'hystérésis pseudo-différentiels

**Participant** : Michel Sorine.

Nous avons défini avec Denis Matignon et Gérard Montseny une extension de la classe

---

[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.

d'opérateurs d'hystérésis (4) au cas des opérateurs pseudo-différentiels, voir [73]. Nous avons pour cela utilisé une représentation diffusive de ces opérateurs [Mon98,Mat98].

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

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

#### 6.3.1 Modélisation en électrophysiologie cardiaque

Ce travail de M. Landau a porté sur l'étude des divers comportements d'un système constitué d'une cellule ventriculaire normale, couplée à une cellule pathologique rendue ischémique par l'injection d'un courant constant  $I$ . Ce courant correspond à un courant de fuite venant de cellules «blessées» voisines («injury current»). Nous avons cherché à montrer comment dans ce cadre peuvent apparaître à la fois deux des principales pathologies électriques cardiaques :

- L'apparition d'un foyer ectopique (FE) - un groupe de cellules non-autorythmiques le

---

[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.

devient, en générant un rythme qui rentre en concurrence avec le pacemaker physiologique du cœur.

- Le bloc unidirectionnel (BU) pour des raisons très mal comprises, l'onde d'activation se propage à travers un groupe de cellules dans un sens et non dans l'autre.

Aucune théorie ne rendait compte de ces deux pathologies dans le même cadre, alors qu'elles apparaissent, en fait, souvent toutes deux, en conséquence d'une ischémie cardiaque.

On utilise pour modéliser le potentiel d'action cardiaque de chaque cellule, le modèle mathématique de Van Capelle et Durrer. Les divers comportements du système sont étudiés en fonction de la résistance électrique de couplage  $R$  et de courant  $I$ . Pour ce faire, on utilise les méthodes de continuation-bifurcation associées à la simulation numérique directe du système dans les zones de comportements intéressants.

Quand on fait varier  $I$ , on met en évidence trois niveaux de solutions stationnaires, correspondant à des valeurs basses (B), moyennes (M) et hautes (H) du potentiel de repos du système. Quatre points de retournement et deux points de bifurcation de Hopf correspondent à des valeurs critiques de  $I$ , délimitant différentes zones de comportement. Ainsi en faisant croître la valeur de  $I$ , on détermine successivement des solutions du type: B, BA, B.M.H, M.H, H correspondant à l'existence d'une seule ou à la coexistence de deux ou trois solutions stationnaires pour le système.

Dans la zone correspondant à des solutions de type B, pour  $R$  petit on met en évidence deux seuils de dépolarisation bas et haut. Ainsi une dépolarisation entre ces deux seuils de la cellule normale conduit à un bloc de conduction, alors que la même dépolarisation appliquée à la cellule ischémique engendre un potentiel d'action propagée. Pour  $R$  convenablement grand, on obtient au contraire un seuil unique. Une dépolarisation au-dessus de ce seuil conduit à un bloc unidirectionnel quand elle est appliquée à la cellule ischémique et à un potentiel propagé quand elle est appliquée à la cellule normale.

Dans les zones de coexistence de solutions stationnaires multiples, on met en évidence des phénomènes d'hystérésis ainsi que des phénomènes de bloc et de conduction complexes. Avec existence de seuil unique ou multiple, suivant la valeur de  $R$ , et inversion du sens du bloc suivant que le système se trouve sur un niveau B, M ou H.

Des deux points de bifurcation de Hopf émergent des branches de solutions périodiques correspondant à des foyers ectopiques coexistant avec des solutions de type B ou M. Dans ces zones, on trouve de nouveau, quand on dépolarise le système à partir de la solution stationnaire, des phénomènes de BU, avec le même type de seuil, que dans la zone B. Toutefois la propagation correspond dans ce cas à la convergence vers une solution périodique (FE). Dans la zone H, les cellules sont très dépolarisées et incapables de générer une réponse efficace.

Cette étude théorique représente une approche unifiée de certains types de (BU) et de (FE) liés à l'ischémie cardiaque. Une confirmation expérimentale autour de A. Bardou de l'INSERM est à l'étude.

### 6.3.2 Modélisation mécanique du myocarde.

**Participants :** Julie Bestel, Michel Sorine.

Nous avons poursuivi le travail de modélisation du myocarde (voir la section 3.3). Le modèle de Mirsky et Parmley (équation (9)) était apparu inutilisable pour représenter l'élément contractile : partant du repos,  $\dot{\epsilon}_x = 0$ , il est impossible en agissant seulement sur  $k_{1x}$  et  $k_{2x}$  de changer l'équilibre des forces et donc de déclencher le mouvement, car  $\sigma_x$  reste constant. Ce modèle n'est donc utilisable que pour les éléments passifs parallèle et série. Pour pallier cet inconvénient nous avons proposé l'an dernier un modèle décrivant l'évolution de la force et de l'élasticité du muscle en adaptant une approche proposée par Zahalak<sup>[Zah86]</sup>. L'adaptation consiste à faire apparaître la commande dans ce modèle, c'est-à-dire le rôle du Calcium. Cela remet en question le choix *a priori* d'une loi décrivant la distribution des ponts d'union fait par Zahalak.

Le modèle obtenu rendait bien compte du comportement qualitatif lors de la contraction. Utilisé dans un simulateur global du SCV, il est apparu qu'il ne rendait pas bien compte des diverses vitesses de relaxation observables à travers des mesures de pression endocavitaires. Nous avons résolu ce problème en modifiant l'action de la commande sur le modèle de muscle. Le modèle actuel d'élément contractile est maintenant compatible avec : le modèle, au niveau microscopique, dit du «filament glissant de Huxley» ; au niveau macroscopique, avec les observations à l'origine du modèle de Mirsky et Parmley ; toujours à ce niveau avec les vitesses de contraction et de relaxation. Il s'écrit ainsi ( $| | _+$  désigne la partie positive) [42] :

$$\begin{cases} \dot{k}_c = -a(|\dot{\epsilon}_c| + |u|)k_c + b|u|_+ \\ \dot{\sigma}_c = k_c\dot{\epsilon}_c - a(|\dot{\epsilon}_c| + |u|)\sigma_c + \frac{b}{2}|u|_+ \end{cases} \quad (11)$$

Ce système de deux équations différentielles du premier ordre couplées décrit l'évolution de la raideur  $k_c$  et de la contrainte  $\sigma_c$ , connaissant la vitesse de déformation  $\dot{\epsilon}_c$  et une commande  $u$  traduisant l'influence du SNA :  $u > 0$  provoque la contraction en augmentant la fréquence d'attachement des ponts actine-myosine,  $u < 0$  permet d'accélérer la relaxation en jouant sur la fréquence de détachement des mêmes ponts.

Ce modèle rend compte de phénomènes qualitatifs clefs : à partir du repos ( $\dot{\epsilon}_c$  nulle) l'activité peut démarrer en agissant sur  $u$  (passage de 0 à une valeur strictement positive) ; d'autre part, l'expression de la vitesse de déformation obtenue en contraction isotonique ( $\dot{\sigma}_c = 0$ ) est comparable aux observations expérimentales de Hill.

Ce modèle a été incorporé dans un simulateur de circulation sanguine en circuit fermé (circuit représenté figure 4.3.1 et constitué de deux ventricules, quatre compartiments sanguins et des vaisseaux) et programmé dans SCICOS. L'analyse de son comportement est assez complexe. On la décompose en plusieurs études :

- Étude de divers indices représentant le comportement du cœur : indices de contractilité et de relaxation du myocarde ; compliance équivalente lors du remplissage . . .
- Modélisation d'une pathologie : la syncope vaso-vagale. Un patient atteint de cette maladie a

---

[Zah86] G. ZAHALAK, « A Comparison of the Mechanical Behavior of the Cat Soleus Muscle with a Distribution-Moment Model », *J. of Biomechanical Engineering* 108, 1986, p. 131-140.

un cœur sain et une anomalie du contrôle par le SNA ; il est sujet à des pertes de connaissance, par exemple lors du passage de la position couchée à la position debout. L'explication la plus largement acceptée est la suivante : en général, le passage à l'orthostatisme provoque la séquestration d'un volume de sang tel que le remplissage du ventricule droit est diminué ; en réponse à la diminution de débit qui s'ensuit il y a réaction réflexe du système sympathique : augmentation de la force d'éjection et de la fréquence cardiaque. Les patients dits *vagueux* (présentant le syndrome de la syncope vaso-vagale) avaient une réponse anormale des mécano-récepteurs qui réagissent en envoyant aux centres un ordre de levée brutale du sympathique et une stimulation du parasympathique (vasodilatation très importante et bradycardie), qui conduit à l'évanouissement (conséquence de la chute de débit sanguin dans le cerveau).

L'épreuve du tilt-test est censée reproduire les conditions de déclenchement de la syncope chez les sujets *positifs*. L'implantation d'un stimulateur chez ces patients permet, en se substituant au contrôleur naturel, de commander le pompage à une fréquence suffisante pour assurer un débit sanguin correct.

Notre modèle devrait servir à tester cette hypothèse ; il faut pour cela formuler la loi de commande en boucle fermée : caractéristiques de  $u(t)$  (amplitude, rapport cyclique et fréquence) fonctions du volume du cœur et de la pression dans l'aorte. Ensuite nous pourrions simuler l'évolution du système en réponse à un changement de répartition des volumes sanguins entre les différents compartiments.

Collaboration avec le Dr. J.C. Deharo, service de cardiologie de l'Hôpital Sainte-Marguerite, Marseille.

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

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

**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 [Ver96] 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.

---

[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.

**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 :**

- *Application à la physiologie du sommeil :* Le sommeil est organisé en cycles successifs au cours de la nuit, chaque cycle est organisé en stades, aux caractéristiques électrophysiologiques et aux mécanismes régulateurs différents (sommeil lent, pratiquement déconnecté des afférences centrales, sommeil paradoxal, siège de nombreux stimuli). On a étudié la sensibilité à court et à long terme de l'arc baroréflexe sous un régime respiratoire stable, en fonction des stades et des cycles. L'organisation en stades influe de manière dissociée sur les deux types de régulation sauf en sommeil paradoxal, où la sensibilité globale est la plus élevée; l'organisation en cycles n'a pas d'influence sur la sensibilité baroréflexe alors qu'elle est très importante sur les composants spectraux suggérant d'autres mécanismes de contrôle du scv sur l'ensemble de la nuit [32]. Collaboration avec le Service des Explorations Fonctionnelles du Pr Escourrou, Hôpital Antoine Bécère, Clamart.
- *Application à l'insuffisance cardiaque :* L'insuffisance cardiaque présente à la fois des anomalies de l'arc baroréflexe, dont les récepteurs sont saturés par les catécholamines et des schémas respiratoires anormaux. On a donc étudié l'influence de la respiration volontaire sur la sensibilité baroréflexe, en la faisant varier de 0.25 Hz à 0.15Hz; elle diminue chez les insuffisants cardiaques (IC) alors qu'elle augmente chez les sujets contrôles. On a également étudié l'évolution instantanée des amplitudes et phases entre signaux cardio-vasculaires et respiratoires; de grandes variations de phase et de soudaines chutes d'amplitude existent chez les IC à 0.15Hz. Ces deux analyses montrent que la respiration volontaire, en impliquant les structures corticales, révèle une anomalie centrale et fréquence respiratoire-dépendante de la régulation de l'arc baroréflexe [33, 34]. Collaboration avec le Dr. Laurence Mangin, Unité INSERM 127 et service de pharmacologie clinique, Hôpital Henri Mondor.

- *Application à la pharmacologie* : Le comportement du SNA sous influence de drogues inhibitrices a été étudié chez 14 jeunes adultes sains. l'objectif est l'analyse de la composante parasympathique du SNA, à travers les relations entre le tonus vagal, reflété par le rythme cardiaque moyen et les variations haute fréquence de ce rythme, liées à la respiration et appelées Arythmie Sinusale Respiratoire (ASR). On a «déconnecté» pharmacologiquement la branche sympathique du SNA puis injecté à doses progressives un inhibiteur du système parasympathique. Une analyse instantanée temps-fréquence, utilisant la transformation de pseudo Wigner-Ville lissée a permis de suivre ces modifications[35]. Collaboration avec le Pr. J.L. Elghozi, laboratoire de Pharmacologie, Hôpital Necker.

### 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 rhythmicités 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.

---

[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.

- 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 coordonnée entre les différents rhombomères. Les neurones de type III correspondent aux unités «génératrices» qui diffèrent entre rhombomères par le nombre de leurs récepteurs Gabaergiques, 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 représente 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 <sup>[SZ93]</sup> 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 granulos, en réponse à FSH, a été développé [77]. 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 granulos 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

---

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

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

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 adénylate cyclase synthétisant l'AMPc. Tout en décrivant l'évolution temporelle des concentrations moyennes en espèces membranaires (récepteurs libres, liés à FSH sous forme active ou phosphorylée, adénylate 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. 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».

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

**Participants :** Ailton Dias, Catalin Dima, Rachid Djenidi, Fabien Fleutot, Thierry Grandpierre, Rémy Kocik, Christophe Lavarenne, Sébastien Le Nours, Yves Sorel.

**Résumé :** *Amélioration du modèle d'algorithme pour faciliter la génération d'exécutifs et pouvoir spécifier des contraintes temps réel multiples de cadence et de latence. Amélioration du modèle d'architecture multicomposant pour prendre en compte la mémoire de programme et la mémoire de données, les communications inter-processeur par mémoire partagée. Amélioration de l'heuristique d'optimisation de la distribution et de l'ordonnancement pour prendre en compte le conditionnement par des entiers et les contraintes temps réel multiples éventuellement avec préemption, pour prendre en compte les améliorations du modèle d'architecture, et enfin prendre en compte la tolérance aux pannes. Amélioration du générateur d'exécutif pour ré-allouer la mémoire de données et prendre en compte des communications par mémoires partagées. Spécification des règles de génération automatique d'exécutifs. Vérification à l'aide des réseaux de Pétri que les exécutifs générés respectent l'ordre partiel du graphe d'algorithme initial, n'introduisant par ainsi de dead-lock.*

*Étude de fonctions de coût et d'heuristiques de défactorisation pour la génération de net-lists pour circuits intégrés reconfigurables (FPGA). Réalisation d'un noyau d'exécutif SynDEx V5.1 pour processeurs MPC555 et bus CAN, et d'une bibliothèque de fonctions applicatives pour la commande bas niveau du CyCab. Interfaçage de SynDEx V5.1 avec EPHORAT (logiciel d'aide à la programmation de processeurs SIMD) en vue de programmer des System-On-Chip contenant des*

*processeurs de type SIMD, RISC et de traitement du signal. Réalisation de Syn-DEx V6.0 programmé en Caml/Tk permettant des spécifications hiérarchiques, de la répétition finie de sous-graphe et du conditionnement par des entiers.*

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

Nous avons introduit dans le graphe d'algorithme une numérotation et un type de donnée pour les arcs entrant et sortant de chaque opération afin de gérer explicitement les tampons associés aux arguments de la fonction correspondante qui sera appelée ou in-linéé lors de la génération d'exécutifs. Afin de prendre en compte des contraintes multiples nous avons associé à chaque opération une période relative à celle d'une autre opération avec laquelle elle est en dépendance de données, les deux périodes devant être pour l'instant dans un rapport entier. Nous exploitons pour cela le modèle de graphe à répétitions finies proposé il y a deux ans. D'autre part, nous avons introduit la possibilité de définir plusieurs latences. Chaque latence s'applique à deux opérations quelconques du graphe de l'algorithme, elle est définie par un certain nombre de retards logiques (dépendance inter-itération).

Nous avons introduit dans le graphe d'architecture des nouveaux types de sommets modélisant, d'une part la mémoire RAM à accès aléatoire pour stocker les données (produites et consommées par la même opération) ou programmes locaux à un opérateur, et d'autre part la mémoire RAM pour stocker des données communiquées entre opérateurs différents (données produites par une opération et consommées par une autre opération). Les mémoires des données communiquées ne pouvaient être jusqu'à présent que des SAM, c'est-à-dire des mémoires accédées uniquement de manière séquentielle par les opérateurs en utilisant obligatoirement des communicateurs. Ce fonctionnement correspond à une communication inter-processeur par une liaison point-à-point ou multipoint. La SAM la plus simple correspond à deux mémoires à accès séquentiel reliées par une connexion électrique, l'ensemble possédant un comportement global de FIFO. Le sommet RAM pour stocker des données communiquées permet de faire des communications inter-processeur par mémoire partagée. Les opérateurs peuvent ainsi accéder directement à la mémoire partagée, ou y accéder en passant par l'intermédiaire de communicateurs ce qui permet de mieux découpler les calculs et les communications. Ce nouveau modèle a permis de spécifier un plus grand nombre de calculateurs.

Ces diverses améliorations ont conduit à un nouveau type de sommet «identité» associé à un bus/mux/démux/arbitre introduit l'année dernière dans le graphe d'architecture et à un nouveau type de sommet «allocation» associé aux différents types de mémoires, tous deux ajoutés lors de la formalisation de l'implantation par transformation des graphes d'algorithme et d'architecture. Ces derniers sommets modélisent trois types d'allocation pour de la mémoire programme locale, de la mémoire données locale et de la mémoire données communiquées. Ces sommets sont distribués et ordonnancés comme les opérations de calcul et de communications. Ils permettent de prédire la taille des mémoires nécessaires pour l'application.

## 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,

nous avons étendu l'heuristique pour optimiser les différents types de mémoire en effectuant de la ré-allocation statique. De plus, nous prenons aussi maintenant en compte les communications inter-processeur par mémoire partagée de type RAM. En ce qui concerne la hiérarchie et la répétition finie de sous-graphe de l'algorithme, nous avons commencé à étudier la défactorisation partielle, en se basant sur les travaux effectués sur la parallélisation de nids de boucles dans le cas des langages impératifs. Enfin, nous avons proposé deux heuristiques permettant de tolérer des pannes (silence sur panne ou silence intermittent sur panne) des opérateurs et des moyens de communications. Elles diffèrent selon que les moyens de communications sont de type point-à-point ou multipoint avec diffusion, et reposent toutes sur la duplication des opérations et la redondance matérielle.

Nous avons continué à étudier la prise en compte de contraintes temps réel multiples (latences et cadences) dans le cas des architectures multicomposant. Les contraintes multiples de cadence, lorsqu'on les prend en compte hors-ligne, ont pour conséquence d'introduire une hyper-période pouvant conduire à ne pas respecter des contraintes de latence. Celles-ci sont très importantes pour les systèmes de commande car elles correspondent à des retards qui peuvent les rendre non contrôlables. Pour diminuer cette latence il est alors nécessaire de faire de la préemption de certaines opérations de calcul par les opérations d'entrées-sortie qui sont les seules pour lesquelles il faut impérativement respecter une contrainte de cadence. Cependant la préemption ayant un coût, dû aux changements de contextes dynamiques lors de l'exécution en temps réel, nous cherchons à la minimiser. Nous avons proposé une heuristique gloutonne d'optimisation de la distribution et de l'ordonnancement introduisant un niveau de préemption selon une analyse «rate-monotonique» par les opérations d'entrée-sortie, à chaque fois qu'une contrainte de latence n'est pas localement respectée.

En ce qui concerne l'optimisation de l'ordonnancement dans le cas d'un seul circuit reconfigurable, nous avons étudié une heuristique de défactorisation partielle 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 circuit reconfigurable. La partie temps réel de la fonction de coût est basée sur les durées des opérations de calculs et des opérations rajoutées pour réaliser le chemin de contrôle, qui pour l'instant ne concerne que les répétitions (boucles) finies ou infinies de sous-graphes.

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

La génération d'exécutif a été revue pour permettre la ré-allocation des mémoires de données et les communications inter-processeur par mémoire partagée RAM. Nous avons donné les règles de génération automatique d'exécutifs 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 étaient jusqu'à présent des SEND et des RECEIVE de données transmises entre communicateurs via une SAM. Elles peuvent maintenant être aussi 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 donnée ou entre deux itérations infinies consécutives.

Nous avons continué à collaborer avec le LPSI de l'ESIEE pour développer un générateur de net-list dans le cas des circuits reconfigurables (FPGA 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 dynamiquement.

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

Nous étudions dans le cadre du projet RNRT PROMPT, en collaboration avec Thomson-CSF-Communications, Thomson-CSF-LCR, Simulog et le laboratoire CRI de l'Ecole des Mines de Fontainebleau, l'adaptation de la méthodologie AAA et de SynDEx pour la programmation optimisée des SOC 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, pour l'instant uniquement au niveau de la spécification et de la simulation temporelle de l'exécution de l'algorithme sur l'architecture, ceci dans le cadre de 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.

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

La version 5.1 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.

Une nouvelle version de SynDEx, la V6.0, a été développée. Elle est programmée en Caml/Tk et possède en plus des fonctionnalités de la V5, la possibilité de faire des spéci-

fications hiérarchiques, de la répétition finie de sous-graphe et du conditionnement par des entiers. Elle offre une heuristique d'optimisation de distribution et d'ordonnancement dans le cas d'une contrainte unique de cadence égale à la latence, ne permettant pas pour l'instant la défactorisation partielle automatique. L'utilisateur peut choisir entre une défactorisation totale et aucune défactorisation.

## 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 la suite de travaux entrepris en 1998 (Contrat Renault 1 98 D143 00 21102 01 2). Elle est réalisée en collaboration avec le LABORATOIRE DE THERMODYNAMIQUE APPLIQUÉE AUX MACHINES THERMIQUES de l'université de Paris VI (Jacques Jullien et 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. Il sera par la suite 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 Méaupe, Michel Sorine.

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

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 actuels concernent 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 avait pour objectif d'initialiser des travaux de modélisation et de commande qui devaient permettre d'aborder des problèmes de dimensionnement, de gestion globale de l'énergie, de surveillance diagnostic dans les futurs véhicules à piles à combustible. Elle sera suivie par une thèse de K. Bencherif dans le cadre d'une convention CIFRE.

## 7.5 Action de développement LaRA

**Participants :** Rémy Kocik, Christophe Lavarenne, Yves Sorel.

Voir la page web <http://www.lara.prd.fr/> pour une présentation de LaRA. Dans le cadre de LaRA, SynDEx est utilisé pour programmer les algorithmes de contrôle commande et de traitement du signal et d'images, et pour optimiser leur implantation sur l'architecture multi-processeur du véhicule électrique urbain CyCab. Nous avons porté les exécutifs SynDEx développés pour le premier prototype du CyCab, qui comportait des microcontrôleurs MC68332, sur le nouveau CyCab industrialisé par la Sté Robosoft, qui utilise de nouveaux microcontrôleurs MPC555 à base de PowerPC.

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

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

Dans le cadre du projet RNRT PROMPT, une étude est en cours pour adapter 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 envisagée 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.

## 7.7 Contrat Synopsis-Castor

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

Le noyau d'exécutif SynDEx pour le 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.

# 8 Actions régionales, nationales et internationales

## 8.1 Actions nationales

### 8.1.1 Actions de recherche coopératives Inria

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

- Action de Recherche Coopérative ICEMA.

Voir la page web <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.

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

**Participants** : Julie Bestel, 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 ([14]). 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.

### 8.1.3 Projet National RNRT

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

Projet PROMPT (Placement Rapide Optimisé sur Machines Parallèles pour les applications Télécoms) avec Thomson-CSF-Télécommunications, Thomson-CSF-LCR, Simulog et Armines.

### 8.1.4 Projet National RNTL

**Participant** : Yves Sorel.

Projet national RNTL ACOTRIS sur la spécification en UML, la vérification avec le langage synchrone SIGNAL et l'implantation avec AAA/SynDEx d'applications distribuées temps réel embarquées.

### 8.1.5 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 et l'Aérospatiale, ainsi que les équipementiers, Sagem, Siemens-AT et Valeo, et ainsi que les laboratoires IRCCyN et LORIA.

Remy Kocik et Yves Sorel ont participé aux travaux concernant d'une part les techniques de placement des logiciels (de base et applicatifs) sur un réseau d'ECUs (Electronic Control Unit), et d'autre part la définition de «composants logiciels standards» dans le domaine des transports.

Le projet national AEE se terminant en 2001, il est actuellement en train d'être étendu au niveau Européen dans le cadre du programme ITEA de EUREKA. Il est envisagé qu'un nouveau projet comprenant les partenaires de AEE plus d'autres partenaires européen du domaine des transports, tels que Daimler-Chrysler, Fiat, Bosh, Delphi, Magneti-Marelli ... démarre en 2001.

### 8.1.6 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, MELJE, PAMPA et SOSSO. Cette action accompagne le projet national AEE.

## 8.2 Actions européennes

### 8.2.1 Projet Européen SAFE

**Participant** : Yves Sorel.

Projet sur des AGV (Automatic Guided Vehicle) tolérants aux pannes, utilisés dans les transports publics à grande capacité (bus automatiques pouvant contenir 120 passagers).

## 8.3 Actions internationales

### 8.3.1 Projet de l'institut Lyapounov

**Participant** : Michel Sorine.

«Gyroscopes vibrants» (1999–2000).  
Coopération avec l'avant-projet MACS. Responsables : D. Chapelle, Y.K. Zbhanov.

### 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.

## 8.4 Visites, et invitations de chercheurs

### 8.4.1 Visites, invitations de chercheurs du projet

- Pierre-Alexandre Bliman a séjourné au Département de Mathématiques de l'École Polytechnique d'Athènes (Grèce), dans le cadre du Programme européen TMR «Breakthrough in the

control of nonlinear systems» (Octobre 1999-Juillet 2000).

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

#### 8.4.2 Visites de chercheurs étrangers

**Participants** : Alexandre M. Krasnosel'skii [Université de Moscou], Jonathan Partington [Université de Leeds], Panagiotis Tsiotras [Georgia Institute of Technology, Atlanta].

Ont effectué des visites de courtes durées 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 groupe de travail GT7: Adéquation Algorithme Architecture du PRC-GDR ISIS (Information Signal Images et viSion). Il participe au GDR-PRC ARP.

#### GDR Systèmes à retards

Pierre-Alexandre Bliman et Catherine Bonnet : participation à ce GdR pour l'ensemble des activités du projet liées au retard. S. Bismuth et M. Sorine sont membres de ce GDR.

#### Divers

- Catherine Bonnet a fait partie du comité d'organisation de MTNS 2000, 14ème édition de l'*International Symposium on the Mathematical Theory of Networks and Systems*, Perpignan, 19-23 juin 2000. Elle a fait aussi partie du Comité d'organisation du Forum des Jeunes Mathématiciennes, janvier 2000, IHP, Paris. Elle fait partie du bureau de Femmes et Mathématiques et du conseil de la SMF. Elle organise le séminaire Metalau / Sosso. 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 a fait partie du comité de programme de MTNS 2000, Perpignan, 19-23 juin 2000. 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

- J. Bestel est chargée de TD de math. 1ère année cycle d'ingénieur, section électronique et traitement de l'information, ICPE-Lyon.
- 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).
- Y. Sorel donne les cours suivants : «Spécification, vérification et optimisation des systèmes distribués temps réel embarqués», Ecole d'ingénieurs ESIEE, Noisy-le-Grand ; cours «Adéquation Algorithme Architecture», DEA Orsay «Systèmes électroniques de traitement de l'information».

## Formation permanente

- C. Médigue, A. Monti : formation à l'utilisation du logiciel LARY\_CR.
- C. Lavarenne et Y. Sorel : nombreuses sessions de formation au logiciel SynDEx.

## 9.3 Participation à des colloques, séminaires, invitations

Pierre-Alexandre Bliman :

- Enseignement à l'Ecole d'été du Laboratoire d'Automatique de Grenoble *Analyse et commande des systèmes à retards* : «Robust absolute stability of delay systems», 1h30 (Septembre 2000).
- Présentation devant le GdR – Systèmes à retards : «On absolute stability of delay systems» (Février 2000).
- Séminaire à l'École Polytechnique d'Athènes (Grèce) : «Quadratic Lyapunov functionals and stability of linear delay systems» (Juillet 2000).

Catherine Bonnet : partenariat avec le lycée Camille-Sée (atelier de recherche), accord «passion-recherche».

Michel Sorine : séminaire au LAAS «Sur une classe d'opérateurs d'hystérésis différentiels : point de vue de la théorie des systèmes et applications», 10 mai 2000.

# 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] 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.

- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] C. BONNET, J.R. PARTINGTON, «Robust stabilization in the BIBO gap topology», *International Journal of Robust and Nonlinear Control* 7, 1997, p. 429–447.
- [6] 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.
- [7] D. CLAUDE, J. CLAIRAMBAULT, «Period shift induction by intermittent stimulation in a *Drosophila* model of PER protein oscillations», *Chronobiology International*, 2000, p. 1–14.
- [8] F. CLÉMENT, «Optimal control of the cell dynamics in the granulosa of ovulatory follicles», *Math. Biosci.* 152, 1998, p. 123–142.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] C. LAVARENNE, Y. SOREL, «Performance Optimization of Multiprocessor Real-Time Applications by Graph Transformations», in : *Proc. of Parallel Computing 93 Conference*, Grenoble, September 1993.
- [12] 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.
- [13] 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

- [14] 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.

### Thèses et habilitations à diriger des recherches

- [15] 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.

- [16] A. DIAS, *Contribution à l'implantation optimisée d'algorithmes bas niveau de traitement du signal et des images sur des architectures mono-FPGA à l'aide d'une méthodologie d'adéquation algorithme-architecture*, thèse de doctorat, Université de Paris Sud, Spécialité informatique, 12/07/2000.
- [17] T. GRANPIERRE, *Modélisation d'architectures parallèles hétérogènes pour la génération automatique d'exécutifs distribués temps réel optimisés*, thèse de doctorat, Université de Paris Sud, Spécialité informatique, 22/11/2000.
- [18] R. KOCIK, *Sur l'optimisation des systèmes distribués temps réel embarqués : application au prototypage rapide d'un véhicule électrique semi-autonome*, thèse de doctorat, Université de Rouen, Spécialité informatique industrielle, 22/03/2000.

## Articles et chapitres de livre

- [19] 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.
- [20] C. BAILLARD, P. MANSIER, P.V. ENNEZAT, C. MÉDIGUE, A. OUBÉNAÏSSA, B. SWYNGHE-DAUW, B. CHEVALIER, « Reversible enhancement in QT interval in spontaneously hypertensive rats », *Hypertension* 36, 2000, p. 350–354.
- [21] J. BESTEL, J. CLAIRAMBAULT, C. MÉDIGUE, A. MONTI, M. SORINE, « Le système cardiovasculaire et sa régulation par le système nerveux autonome: modélisation et mesures », in : *Actes du Programme de recherche "Automatique, Biologie et Santé: Modélisation et commande de régulations biologiques"*, D. Claude (éditeur), *ESAIM: Proceedings*, 9, EDP Sciences, Les Ulis, France & Cambridge, USA, 2000, p. 65–92.
- [22] P.-A. BLIMAN, « Extension of Popov absolute stability criterion to nonautonomous systems with delays », *Int. J. Control* 73, 15, 2000, p. 1362–1374.
- [23] P.-A. BLIMAN, « Lyapunov-Krasovskii functionals and frequency domain: delay-independent absolute stability criteria for delay systems », *International Journal of Robust and Nonlinear Control*, 2000, à paraître.
- [24] P.-A. BLIMAN, « Robust absolute stability of delay systems », in : *Nonlinear control in the year 2000*, F. Lamnabhi-Lagarrigue, A. Isidori, et W. Respondek (éditeurs), 1, Springer-Verlag, 2000, p. 207–238.
- [25] 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.
- [26] C. BONNET, J.R. PARTINGTON, « Coprime factorizations and stability of fractional differential systems », *Systems and Control Letters* 41, 2000, p. 167–174.
- [27] D. CLAUDE, J. CLAIRAMBAULT, F. LÉVI, « Rythmes biologiques et chronothérapeutique: comparaison entre des schémas d'administration théoriques et des thérapeutiques appliquées en cancérologie », in : *Actes du Programme de recherche "Automatique, Biologie et Santé: Modélisation et commande de régulations biologiques"*, D. Claude (éditeur), *ESAIM: Proceedings*, 9, EDP Sciences, Les Ulis, France & Cambridge, USA, 2000, p. 119–137.
- [28] D. CLAUDE, J. CLAIRAMBAULT, « Period shift induction by intermittent stimulation in a *Drosophila* model of PER protein oscillations », *Chronobiology International* 17, 1, 2000.

- [29] D. CLAUDE, «Présentation du programme de recherche, Journée thématique du GdR “Automatique”», in : *Actes du Programme de recherche “Automatique, Biologie et Santé : Modélisation et commande de régulations biologiques”*, D. Claude (éditeur), *ESAIM: Proceedings, 9*, EDP Sciences, Les Ulis, France & Cambridge, USA, 2000, p. 1–4.
- [30] F. CLÉMENT, J.-C. THALABARD, D. CLAUDE, «Le système de reproduction chez les mammifères vu sous l’angle de la commande», *ESAIM Proc 9*, 2000, p. 31–58, <http://www.emath.fr/Maths/Proc/Vol.9/index.html>.
- [31] F. CLÉMENT, J.-C. THALABARD, D. CLAUDE, «Modélisation et commande de la fonction ovarienne», in : *Actes du Programme de recherche “Automatique, Biologie et Santé : Modélisation et commande de régulations biologiques”*, D. Claude (éditeur), *ESAIM: Proceedings, 9*, EDP Sciences, Les Ulis, France & Cambridge, USA, 2000, p. 31–58.
- [32] P. ESCOURROU, H. NEDELCOUX, A. MONTI, C. MÉDIGUE, «Syndrome d’apnées obstructives et insuffisance cardiaque», *Revue Neurol.*, 2000, à paraître.
- [33] L. MANGIN, A. MONTI, C. MÉDIGUE, I. MACQUIN-MAVIER, M.-E. LOPEZ, P. GUERET, A. CASTAIGNE, J. BESTEL, C. BAILLARD, B. SWYNGHEDAUF, P. MANSIER, «Altered baroreflex gain during voluntary breathing in chronic heart failure», *European Journal of Heart Failure*, 2000, à paraître.
- [34] L. MANGIN, A. MONTI, C. MÉDIGUE, B. SWYNGHEDAUF, «Cardiorespiratory system dynamics in chronic heart failure using complex demodulation», *Journal of Autonomic Nervous System*, 2000, à paraître.
- [35] C. MÉDIGUE, A. GIRARD, D. LAUDE, A. MONTI, M. WARGON, J.-L. ELGHOZI, «Relation between pulse interval and respiratory sinus arrhythmia: a time- and frequency-domain analysis of the effects of atropine», *Plügers Archiv European Journal of Physiology*, 2000, à paraître.
- [36] 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.
- [37] P.M. NDIAYE, M. SORINE, «Delay sensitivity of quadratic controllers. A singular perturbation approach», *SIAM J. Control Optim.* 38, 6, 2000, p. 1655–1682.
- [38] 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.

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

- [39] M. AKIL, A. DIAS, C. LAVARENNE, Y. SOREL, «Vers la synthèse automatique de circuits à partir de graphes algorithmiques factorisés», in : *AAA2000, 5ème Workshop sur l’Adéquation Algorithme Architecture*, Paris, janvier 2000.
- [40] C. ANCOURT, M. BARRETEAU, B. DION, T. GRANDPIERRE, F. IRIGOIN, J. JOURDAN, P. KAJFASZ, C. LAVARENNE, Y. SOREL, «PROMPT : Placement rapide optimisé sur machines parallèles pour applications de télécommunications», in : *AAA2000, 5ème Workshop sur l’Adéquation Algorithme Architecture*, Paris, janvier 2000.

- 
- [41] M. BARRETEAU, P. BONNOT, T. GRANDPIERRE, P. KAJFASZ, C. LAVARENNE, J. MATTIOLI, Y. SOREL, « PROMPT: A Mapping Environment for Telecom Applications on “System on a Chip” », *in: CASE2000, International Conference on Compilers, Architecture and Synthesis for Embedded Systems*, San Jose, Cal. US, november 2000.
- [42] J. BESTEL, M. SORINE, « A differential model of muscle contraction and applications », *in: Schloessmann Seminar on Mathematical Models in Biology, Chemistry and Physics*, Max Plank Society, Bad Lausick, Germany, May 19-23 2000. Communication affichée.
- [43] P.-A. BLIMAN, « Absolute  $\alpha$ -stability for rational and delay systems », *in: 14th International Symposium on Mathematical Theory of Networks and Systems*, MTNS2000, Perpignan, 19-23 june, 2000.
- [44] P.-A. BLIMAN, « Lyapunov-Krasovskii method and strong delay-independent stability of linear delay systems », *in: 2nd IFAC Workshop on Linear Time Delay Systems*, Ancona, Italy, September 11-13 2000.
- [45] P.-A. BLIMAN, « Stability of linear delay systems. A note on frequency domain interpretation of Lyapunov-Krasovskii method », *in: 14th International Symposium on Mathematical Theory of Networks and Systems*, MTNS2000, Perpignan, 19-23 june, 2000.
- [46] C. BONNET, J.R. PARTINGTON, « Stabilization and nuclearity of fractional differential systems », 2000. MTNS2000, Perpignan, 19-23 june.
- [47] C. BONNET, J.R. PARTINGTON, « Stabilization of fractional exponential systems including delays », *in: 2nd IFAC Workshop on Linear Time Delay Systems*, Ancona, Italy, September 11-13 2000.
- [48] C. BONNET, « Stabilité des équations différentielles linéaires à retards et fractionnaires », *in: Femmes et Mathématiques*, IHP, Paris, 21 octobre 2000. Conférence invitée.
- [49] D. CLAUDE, « Modèles PK/PD de bactéricidie avec persistance bactérienne », *in: colloque N° 7, Variabilité de la thérapeutique médicamenteuse: décrire et estimer pour prédire et contrôler*, Treizièmes entretiens du Centre Jacques Cartier, Montréal, Québec, 3-6 octobre 2000. conférence invitée.
- [50] F. CLÉMENT, J.-C. THALABARD, D. MONNIAUX, D. CLAUDE, « Dynamique de production d'AMPc induite par FSH dans la granulosa », *in: 32-ème congrès de la Société Francophone de Chronobiologie*, Marseille, 15-17 mai 2000.
- [51] F. CLÉMENT, J.-C. THALABARD, D. MONNIAUX, D. CLAUDE, « Dynamique de production d'AMPc induite par FSH dans la granulosa », *in: 32ème congrès de la Société Francophone de Chronobiologie*, Marseille, 15-17 Mai 2000.
- [52] F. CLÉMENT, J.-C. THALABARD, D. MONNIAUX, D. CLAUDE, « FSH-induced cAMP production in ovarian follicles », *in: Symposium on Trends in Nonlinear Analysis - TiNA 2000, Theory, Modelling and Computation*, Heidelberg, Germany, October 8 to 12 2000.
- [53] F. CLÉMENT, J.-C. THALABARD, D. MONNIAUX, D. CLAUDE, « Modelling of FSH-induced cAMP production in ovarian follicles », *in: Schloessmann Seminar on Mathematical Models in Biology, Chemistry and Physics*, Max Plank Society, Bad Lausick, Germany, May 19-23 2000. Communication affichée.

- [54] F. CLÉMENT, « Contrôle de la chronologie des événements préovulatoires », *in* : 32-ème congrès de la Société Francophone de Chronobiologie, Marseille, 15-17 mai 2000.
- [55] S. CORVAISIER, D. CLAUDE, G. CARRET, P. MAIRE, « Modélisation et simulation d'une thérapeutique antibiotique adaptée à un rythme biologique bactérien », *in* : 32-ème congrès de la Société Francophone de Chronobiologie, Marseille, 15-17 mai 2000.
- [56] S. CORVAISIER, F. ROUGIER, D. CLAUDE, P. MAIRE, R.-W. JELLIFFE, « Efficacité bactéricide et rythme d'administration : application d'un modèle de bactéricidie à l'amoxicilline », *in* : Journées Nationales d'Infectiologie organisées par l'Association des Professeurs de Pathologie Infectieuse et Tropicale (APPIT) et la Société de Pathologie de Langue Française (SPILF), 2000.
- [57] P. ESCOURROU, A. MONTI, C. MÉDIGUE, « Analyse spectrale cardio-respiratoire », Société française de recherche sur le sommeil, Montpellier, Novembre 2000.
- [58] F. GÉNOT, D. CHAPELLE, M. SORINE, A. HASSIM, M. DELFOUR, « On the dynamics and control of resonating gyros », *in* : Second European Conference on Structural Control ENPC, Champs sur Marne, France, 3-6 July 2000.
- [59] A. KETFI-CHERIF, D. VON WISSEL, S. BEURTHEY, M. SORINE, « Modeling and Control of a NOx Trap Catalyst », *in* : SAE2000, Detroit, Michigan, 2000-01-1199, March 6-9 2000.
- [60] R. KOCIK, Y. SOREL, « De la modélisation à la réalisation : réduction du cycle de développement des applications temps réel distribuées », *in* : 8th RTS2000 Real-Time Systems Conference, Paris, march 2000.
- [61] L. MANGIN, A. MONTI, C. MÉDIGUE, I. MACQUIN-MAVIER, M.E. LOPEZ, P. GUERET, A. CASTAIGNE, J. BESTEL, C. BAILLARD, B. SWYNGHEDAUW, P. MANSIER, « Baroreflex in chronic heart failure. Abnormal gain during paced-breathing », *in* : Archives des Maladies du Coeur et des Vaisseaux, Journées Européennes de la Société Française de Cardiologie, Paris, Janvier 2000. 93,58,C202.
- [62] L. MANGIN, A. MONTI, C. MÉDIGUE, B. SWYNGHEDAUW, « Cardiorespiratory system dynamics in chronic heart failure using complex demodulation », Autonomic Neuroscience, satellite meeting: Neural regulation of cardiovascular function explored in the frequency domain, Milan, Italie, Juillet 2000.
- [63] C. MÉDIGUE, A. GIRARD, D. LAUDE, A. MONTI, M. WARGON, J.L. ELGHOZI, « Relation between vagal tone and respiratory sinus arrhythmia: a time and frequency-domain analysis of the effects of atropine », *in* : Archives des Maladies du Coeur et des Vaisseaux, 19 eme Journées de l'Hypertension Arterielle, Paris, 9-10 decembre 1999. tome 92, hors-serie, p. 23.
- [64] A. MONTI, L. MANGIN, C. MÉDIGUE, B. SWYNGHEDAUW, « Cardiorespiratory system dynamics in chronic heart failure using complex demodulation and smoothed pseudo Wigner-Ville distribution », First international workshop on non-invasive haemodynamic, autonomic and vascular monitoring, Graz, Autriche, 27-29 Octobre 2000.
- [65] A. MONTI, C. MÉDIGUE, H. NEDELCOUX, P. ESCOURROU, « Cardiovascular autonomic control during sleep in normal subjects », 6th World Congress on Sleep Apnea, Sidney, 12-15 Mars 2000. Final Programme Abstracts, p.50.
- [66] A. MONTI, C. MÉDIGUE, H. NEDELCOUX, P. ESCOURROU, « Cardiovascular autonomic control during sleep in normal subjects », European Study Group of CardioVascular Oscillation, Cardiff, Wales, Avril 2000.

- [67] P.M. NDIAYE, M. SORINE, «Delay sensitivity of quadratic controllers: A singular perturbation approach», *in: Proc. of 39th IEEE CDC, Sydney (Australia)*, December 12-15 2000.
- [68] M. SORINE, J. SZYMANSKI, «A new dynamic multi-DOF tire-model», *in: 9th Symposium on Control in transportation systems*, Braunschweig, Germany, June 13-15 2000.

## Rapports de recherche et publications internes

- [69] P.-A. BLIMAN, «LMI characterization of the strong delay-independent stability of delay systems via quadratic Lyapunov-Krasovskii functionals», *Rapport de recherche n° 3968*, INRIA, juillet 2000, <http://www.inria.fr/rrrt/rr-3968.html>.
- [70] P.-A. BLIMAN, «Stability of nonlinear delay systems: delay-independent small gain theorem and frequency domain interpretation of the Lyapunov-Krasovskii method», *Rapport de recherche n° 3969*, INRIA, juillet 2000, <http://www.inria.fr/rrrt/rr-3969.html>.
- [71] A. GIRAULT, C. LAVARENNE, M. SIGHIREANU, Y. SOREL, «Fault-Tolerant Static Scheduling for Real-Time Distributed Embedded Systems», *Rapport de recherche n° 4006*, INRIA, septembre 2000, <http://www.inria.fr/rrrt/rr-4006.html>.
- [72] C. MÉDIGUE, A. MONTI, L. MANGIN, «LARY\_CR: Software package for the Analysis of Cardio Vascular and Respiratory Rhythms and their Control by Autonomic Nervous System, in the SCILAB-SCICOS environment», *Rapport Technique n° preprint*, Inria, Rocquencourt, 2000, à paraître.
- [73] M. SORINE, G. MONTSÉNY, D. MATIGNON, «On a class of pseudo-differential hysteresis operators», *Rapport de recherche n° 00104*, LAAS, march 2000.

## Divers

- [74] C. BONNET, J.R. PARTINGTON, M. SORINE, «A vectorial Matching Pursuit algorithm applied to the analysis of Vecto-cardiogram data», 2000, article soumis.
- [75] C. BONNET, J.R. PARTINGTON, «Analysis of fractional delay systems of retarded and neutral type», 2000, article soumis.
- [76] C. BONNET, J.R. PARTINGTON, «Stabilization of fractional exponential systems including delays», 2000, article soumis.
- [77] F. CLÉMENT, D. MONNIAUX, J. STARK, K. HARDY, J.-C. THALABARD, S. FRANKS, D. CLAUDE, «A mathematical model of FSH-induced cAMP production in ovarian follicles», 2000, article soumis.
- [78] T. GRANDPIERRE, «Prototypage rapide optimisé d'applications temps réel multiprocesseurs embarqués - La méthodologie Adéquation Algorithme Architecture», Présentation orale, Colloquium Junior, 29 Février 2000.
- [79] A. MONTI, C. MÉDIGUE, H. NEDELCOUX, P. ESCOURROU, «Cardiovascular autonomic control during sleep in normal subjects», 2000, soumis.