

Projet SOSSO

Applications et Outils de l'Automatique

Rocquencourt

THÈME 4A

R *apport*
d'Activité

1999

Table des matières

1	Composition de l'équipe	4
2	Présentation et objectifs généraux	6
3	Fondements scientifiques	8
3.1	Modélisation et analyse des systèmes à hystérésis	8
3.1.1	Modèles d'hystérésis et applications	8
3.1.2	Comportement qualitatif de systèmes semi-linéaires. Problèmes de stabilité et d'oscillations	12
3.2	Commande robuste de systèmes à retards	13
3.3	Modélisation mécanique du myocarde.	17
3.4	Méthode d'Adéquation Algorithme Architecture"	19
3.4.1	Contexte et objectifs	19
3.4.2	Modèle d'algorithme	20
3.4.3	Modèle d'architecture	21
3.4.4	Modèle d'implantation	22
3.4.5	Optimisation d'implantation	22
3.4.6	Génération d'exécutifs et de "net-lists"	23
4	Domaines d'applications	24
4.1	Panorama	24
4.2	Automatique, Informatique et Automobile	25
4.2.1	Les thèmes de l'accord Inria-Renault en électronique embarquée dans l'automobile	25
4.2.2	Les sujets de recherche	25
4.3	Automatique, Traitement du signal et Génie biomédical: modélisation du système cardio-vasculaire et de sa régulation par le système nerveux autonome. Application à la clinique	26
4.3.1	Traitement des signaux physiologiques	26
4.3.2	Description interne du système cardio-respiratoire et modélisation des mécanismes de régulation	27
4.3.3	Modélisation et simulation du réseau neuronal rythmogène embryonnaire à l'origine du rythme respiratoire	31
4.4	Systèmes embarqués pour la commande et le traitement du signal et des images	31
5	Logiciels	31
5.1	LARY_CR, logiciel d'analyse des rythmes cardio-respiratoires	31
5.2	SynDEx, logiciel d'aide à l'implantation d'applications temps réel embarquées	32
6	Résultats nouveaux	32
6.1	Stabilité et comportement qualitatif des systèmes non linéaires	32
6.2	Systèmes non linéaires à retards	33

6.2.1	Commande robuste de systèmes non linéaires à retards	33
6.2.2	Commande robuste de systèmes linéaires fractionnaires	33
6.2.3	Commande de systèmes à retard avec sortie tout-ou-rien	34
6.3	Modélisation et analyse de la régulation des systèmes cardio-vasculaire et cardio-respiratoire par le système nerveux autonome. Applications cliniques . . .	35
6.3.1	Détection d'événements sur l'électrocardiogramme	35
6.3.2	Modélisation en électrophysiologie cardiaque	35
6.3.3	Étude théorique des ondes de Mayer et sensibilité de l'arc baroréflexe. . .	36
6.3.4	Modélisation mécanique du myocarde.	37
6.3.5	Applications cliniques en cours en 1999	38
6.4	Schéma chronopharmacologique théorique pour corriger un cycle altéré : exemple de la protéine PER chez la Drosophile	40
6.5	Modélisation et commande de la fonction ovarienne	41
6.6	Méthode d'Adéquation Algorithme Architecture"	42
7	Contrats industriels (nationaux, européens et internationaux)	44
7.1	Stop&Go	44
7.2	Modélisation mathématique d'organes de véhicules automobiles à basse consommation. Applications en simulation, estimation et commande	45
7.3	Modélisation de la pollution et de la consommation de moteurs essence	46
7.4	Exemples de problèmes d'automatique des systèmes hybrides : modélisation, optimisation et commande de divers groupes motopropulseurs	46
7.5	Application des modèles de frottements secs à la caractérisation de suspensions à lames pour poids-lourds	47
7.6	Modèles réduits du contact pneu/sol et applications	48
7.7	SynDEX et les collaborations industrielles	49
8	Actions régionales, nationales et internationales	49
8.1	Actions régionales	49
8.2	Actions nationales	49
8.2.1	Actions de recherche coopératives Inria	49
8.2.2	Programme de recherche interdisciplinaire "Modélisation et commande des régulations biologiques"	50
8.2.3	Projet National RNRT PROMPT	50
8.2.4	Projet national AEE	50
8.2.5	Action de développement Inria AEE	50
8.3	Actions financées par la Commission Européenne	51
8.4	Relations bilatérales internationales	51
8.4.1	Projets de l'institut Lyapounov	51
8.4.2	Amérique	51
8.5	Accueils de chercheurs étrangers	51

9	Diffusion de résultats	52
9.1	Animation de la communauté scientifique	52
9.2	Enseignement universitaire	52
9.3	Participation à des colloques, séminaires, invitations	53
10	Bibliographie	53

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 depuis le 1/10/99]

Claire Médigue [IE]

Collaborateurs extérieurs

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

Daniel Claude [Professeur, Université d'Orsay, en délégation à l'Inria du 1/10/98 au 30/09/99.]

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

Michel Delfour [Centre de Recherches Mathématiques, Montréal]

Leonid Fridman [Université de Samara, Russie]

José Herskovits Norman [Université Fédérale de Rio de Janeiro]

Alexandre M. Krasnosel'skii [Université de Moscou]

Jonathan Partington [Université de Leeds]

Chercheurs post-doctorants

Sophie Bismuth [depuis Juin 1999]

Mihaela Sighireanu [ARC TOLERE]

Ingénieurs experts

Ahmed Ketfi-Cherif [jusqu'au 30/09/99]

Christophe Lavarenne

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 Meta2, 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]

David Maurel [Cifre Renault, Université de Paris-Dauphine]

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

Alessandro Monti [bourse MENRT, Université d'Orsay]

Joël Szymanski [Cifre Renault, Université d'Orsay]

Annie Vicard [bourse Inria, Université de Villetaneuse]

Stagiaires

Serge Gorsanovs [École polytechnique]

Tony Noël [IUP du Littoral, Calais]

2 Présentation et objectifs généraux

L'Automatique étudie les méthodes permettant de modifier le comportement d'un processus dynamique pour obtenir un comportement désiré. La commande y a une place prépondérante et les recherches dans ce domaine souvent présupposent la connaissance d'un modèle du processus à commander et l'existence de technologies (capteurs, actionneurs, moyens informatiques) pour la réalisation de l'organe de commande. En fait l'impact de l'Automatique dépend autant des progrès en commande que de notre capacité à modéliser, en vue de la commande, les nouveaux processus, ou de notre capacité à mettre en œuvre les nouvelles techniques de réalisation. Ces nouveaux processus vont du composant isolé que l'on pourra étudier dans un cadre mathématique homogène, jusqu'au système, assemblage de tels composants, pour lequel il n'existe pas encore, en général, de tel cadre d'étude. Même dans le cas du "simple" composant, le choix d'un modèle pour la commande peut dépendre de la nature du contrôleur, des actionneurs et capteurs disponibles ... Un contrôleur ne sera finalement retenu que si sa complexité et son éventuelle insertion dans un système sont maîtrisées avec les outils de développement disponibles. Cela pose dès maintenant des problèmes de "co-design" matériel-logiciel dont nous étudions quelques aspects directement utiles dans nos applications. Ce mélange d'automatique continue et d'informatique temps réel, que l'on retrouve sous diverses formes dans plusieurs projets d'Automatique, est pour nous un moyen d'identifier des problèmes de l'Automatique des systèmes hybrides (à temps et états continus ou discrets), qui devrait se développer avec l'aspect système évoqué précédemment.

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

Les domaines d'application privilégiés sont l'AUTOMOBILE, la SANTÉ et les SYSTÈMES EMBARQUÉS pour l'Automatique et le Signal (voir la section 4.1).

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, devrait être reconduit 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, assemblage complexe d'éléments faisant intervenir des phénomènes mécaniques et électrochimiques. 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 des régulations biologiques" que coordonne Daniel Claude.

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

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

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

La modélisation mathématique, l'identification et la commande :

- De *systèmes à hystérésis* avec, actuellement, des applications aux problèmes de frottements ; aux problèmes de commande moteur ; en électrophysiologie cardiaque (étude du myocarde).
- De *systèmes de réaction - diffusion* avec application à la modélisation de phénomènes physico-chimiques rencontrés dans nos applications "Santé" : conduction dans les nerfs sympathique ou parasympathique, dynamique du Calcium dans les cellules cardiaques - ou dans nos applications "Automobile" : dynamique des pots catalytiques et sondes de richesse pour moteurs à combustion interne, modèles réduits pour ces moteurs.
- De *systèmes à retards* qui interviennent en automobile (régulation de richesse des gaz, commande d'organes à travers un bus multiplexé ...).

- De *systèmes oscillants*, souvent à base d'éléments précédents : hystérésis, retards ... et qui interviennent aussi bien en automobile ("battements de sonde" de richesse, cycles limites de stockage/déstockage des oxydes d'azote dans un "piège à NO_x ...) ou liés au système cardio-respiratoire (Ondes de Mayer et sous-harmoniques du rythme cardiaque, rythme endogène respiratoire ...).

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

- Spécification de traitements multicadences complexes en utilisant SCILAB et SCICOS développés par le projet META2. 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, 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) communicant 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 et analyse des systèmes à hystérésis

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

Mots clés : hystérésis, cycle d'hystérésis, solution périodique, résonance paramétrique, frottement, comportement élasto-plastique, hystérésis en chimie.

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. On décrit les problèmes de comportement qualitatif qui ont été étudiés pour des systèmes obtenus en couplant ces modèles d'hystérésis à des équations différentielles. Des exemples d'applications, traitées dans le projet, sont présentés.*

3.1.1 Modèles d'hystérésis et applications

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^[BS96]. Il est utilisé pour l'étude du contact pneu/sol.
- 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^[ALS96] et aussi lors de l'étude du couplage cellules cardiaques pacemaker - cellules non pacemaker^[LL97].
- 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^[KP89,Vis88], 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,

-
- [BS96] P. 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.
 - [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.
 - [KP89] M. KRASNOSEL'SKIĬ, A. 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.

qui conduit à des cycles d'hystérésis rectangulaires, évidemment indépendants de l'amplitude $|\dot{u}|$ de la vitesse.

Nous avons montré^[BS93] le résultat de factorisation suivant qui caractérise les opérateurs d'hystérésis et permet d'en construire de nombreux sous la forme, très utile dans les applications, d'une équation d'état et d'une équation de sortie :

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 $H(u)$:

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

[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.

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^[BS95].

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-potential de dissipation et d'une fonction d'énergie libre, formes quadratiques qui apparaissent dans l'expression du travail^[BS96] :

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

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) ($A = k_1 < 0$, $B = k_2 > 0$, $C = 1$, $D = 0$) :

$$\dot{f} = k_1 f |\dot{u}| + k_2 \dot{u}, \quad (4)$$

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/diagnostic en temps réel^[ALS96]. Voici un exemple de modèle simple, utile en commande :

$$\begin{cases} \dot{\mathcal{R}} = -\frac{V_g}{L}(\mathcal{R} - \mathcal{R}^{in}) + K(\theta_s - \theta_s(0)), \\ \dot{\theta}_s = \mu(\text{sign} \dot{\mathcal{R}}) \left(\frac{1 - \text{sign} \dot{\mathcal{R}}}{2} - \theta_s \right) |\dot{\mathcal{R}}|, \end{cases} \quad (5)$$

où θ_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.

[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.

[BS96] P. 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.

[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.

Hystérésis et muscle cardiaque. Le muscle cardiaque présente des comportements élasto-plastiques modélisables avec les modèles précédents, voir section 3.3 le modèle (8) et section 6.3.4 le modèle (10). La situation est ici particulièrement intéressante car des descriptions fines de la constitution des muscles sont disponibles, ce qui devrait permettre de rechercher des bases physiques pour ces modèles.

3.1.2 Comportement qualitatif de systèmes semi-linéaires. Problèmes de stabilité et d'oscillations

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

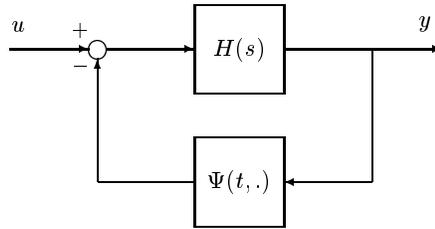
- Pour le frottement, les régimes périodiques interviennent par exemple lors de l'utilisation de "dither", vibration rapide que l'on impose au système pour réduire le frottement. Ces régimes peuvent également être gênants, provoquant des blocages intermittents du mouvement ("stick-slip"); on cherche alors à les éviter^[BS95].

- 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^[ABS97]. 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^[ZN42].

- 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 4.3.2.

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^[BKS95], stabilité des cycles, résonance paramétrique^[BKSV96], observabilité ...

-
- [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. AOUCHICHE, 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.
- [ZN42] J. G. ZIEGLER, N. B. NICHOLS, «Optimum settings for automatic controllers», *Trans. Amer. Soc. Mech. Engrs* 64, 1942, p. 759-768.
- [BKS95] P.-A. BLIMAN, A.-M. KRASNOSEL'SKII, M. SORINE, «Dither in systems with hysteresis», *rapport de recherche n° 2690*, Inria, 1995.
- [BKSV96] P.-A. BLIMAN, A. KRASNOSEL'SKII, M. SORINE, A. VLADIMIROV, «Nonlinear Resonance in

FIG. 1: *Système semi-linéaire*

H est un opérateur linéaire, comportant éventuellement des retards, ψ une non-linéarité éventuellement partiellement hystérétique, u représente les entrées commandées, mais aussi les bruits. Par exemple, le modèle (5) du pot catalytique est de ce type :

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

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

3.2 Commande robuste de systèmes à retards

Participants : Catherine Bonnet, Jonathan Partington, Michel Sorine.

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_∞ (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^[Vid85,GS90,GS95], incluant des perturbations sur le retard. Dans ce qui suit 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^[CZ95] pour une introduction à ces notions).

Les problèmes de contrôle que nous considérons sont illustrés par la figure 2.

r 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 Δ_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 δ_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

-
- [Vid85] M. VIDYASAGAR, *Control System Synthesis*, MIT Press, 1985.
- [GS90] T. T. GEORGIU, M. C. SMITH, «Optimal robustness in the gap metric», *IEEE Transactions on automatic control* 35, 6, 1990, p. 673–686.
- [GS95] T. T. GEORGIU, M. C. SMITH, «Metric uncertainty and nonlinear feedback stabilization», in : *Feedback control, nonlinear systems, and complexity*, Springer (éditeur), *Lecture Notes in Control and Inform. Sci.*, 202, p. 88–98, 1995.
- [CZ95] R. CURTAIN, H. ZWART, *An Introduction to Infinite- Dimensional Linear systems Theory*, Springer-Verlag, 1995.

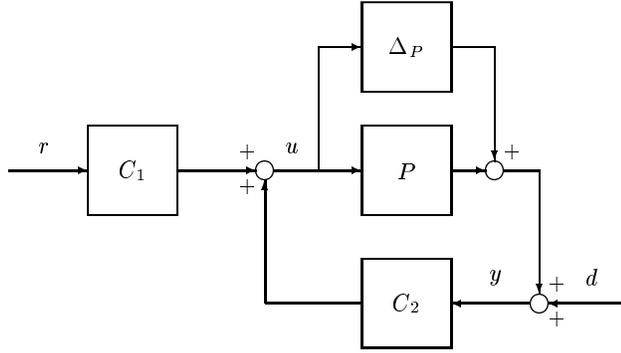


FIG. 2: Implémentation idéalisée d'un contrôleur à deux degrés de liberté C_1 , C_2 .

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

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

$$\|W(I - NU^{opt})\|_{\hat{\mathcal{A}}(0)} = \inf_{U \in \hat{\mathcal{A}}(0)} \|W(I - NU)\|_{\hat{\mathcal{A}}(0)}, \quad (6)$$

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 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 Δ_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^[Vid85] que pour chaque contrôleur $C = (Y + NQ)^{-1}(X + DQ)$, il existe un voisinage de P ,

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

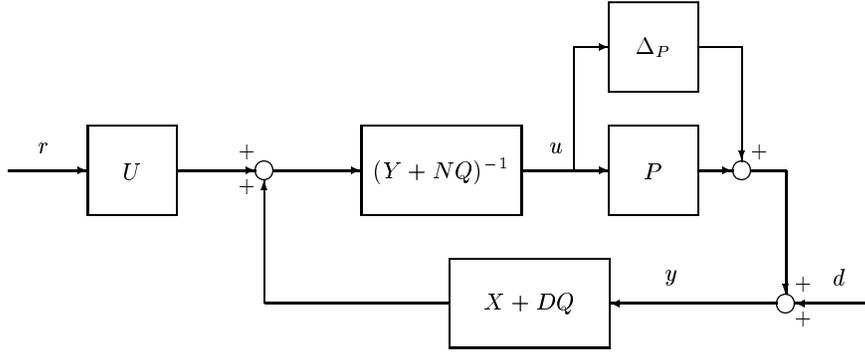


FIG. 3: Implémentation réaliste d'un contrôleur à deux degrés de liberté U , Q .

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 (Δ_N^0, Δ_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

$$\left\| \begin{pmatrix} X \\ Y \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} D \\ N \end{pmatrix} Q^{opt} \right\|_{\infty} = \inf_{Q \in H_{\infty}} \left\| \begin{pmatrix} X \\ Y \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} D \\ N \end{pmatrix} Q \right\|_{\infty}, \quad (7)$$

problème d'optimisation H_{∞} qui se posait déjà dans le cadre L^2 (contrôleur H_{∞} -optimal déterminé par Georgiou et Smith ^[DGS95]) 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_{∞} 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 $\hat{A}(0)$ 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.

[DGS95] 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.

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 [19].

Dans le deuxième cas nous avons repris un schéma de contrôleur à deux degrés de liberté [18, 19]. 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 $\hat{A}(0)$ 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")^[GS97]. Nous avons proposé une famille de contrôleurs non linéaires qui stabilisent de façon incrémentale la boucle fermée en présence de l'opérateur de saturation ou de l'opérateur signe. Dans le cas du signe, la robustesse ne peut être analysée que suivant la gf-stabilité; cependant, dans le cas où la poursuite est réalisée, nous obtenons des conditions garantissant la norme-stabilité de la boucle fermée (les contrôleurs sont donc localement norme-stabilisant). Dans le cas d'une saturation, la robustesse est analysée suivant la norme-stabilité. Pour une sous-classe de contrôleurs, nous obtenons des marges de robustesse relativement à la stabilité incrémentale.

3.3 Modélisation mécanique du myocarde.

Participants : Julie Bestel, Jean Clairambault, Claire Médigue, Michel Sorine.

Résumé : *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 est l'approche choisie pour étudier le système cardiovasculaire et sa régulation par le système nerveux autonome. Nous donnons ici des éléments de modélisation du cœur.*

Théorie de la contraction musculaire.

L'objectif de ces théories est l'obtention de modèles intermédiaires entre "boîte noire" et "modèles de connaissance", identifiables à l'aide des mesures disponibles pour les premiers (applications visées: surveillance et aide au diagnostic), les plus conformes possible aux connaissances physiologiques pour les derniers (applications visées: représentation des connaissances, études de comportements qualitatifs).

Notre recherche d'un modèle boîte noire compatible avec les modèles de connaissance 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).

[Ver88] M. S. VERMA, « Coprime fractional representations and stability of non-linear feedback systems », *International Journal of Control* 48, 1988, p. 897–918.

[GS97] 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.

Nous présentons ici quelques données de ce problème (pour les données de base voir par exemple le traité de G. Chauvet^[Cha87]).

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 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 (= 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 (σ_x) / déformation (ε_x) observée^[MP73] :

$$\dot{\sigma}_x = k_{1x}\sigma_x|\dot{\varepsilon}_x| + k_{2x}\dot{\varepsilon}_x \quad (8)$$

Le modèle (8) est du type modèle de Dahl (voir (4)). 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 étirement 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".

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 (8).

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

$$\begin{cases} \sigma = \sigma_{EP} + \sigma_{EC}, & \sigma_{EC} = \sigma_{ES} \\ \varepsilon = \varepsilon_{EP} = \varepsilon_{EC} + \varepsilon_{ES} \end{cases} \quad (9)$$

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

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

[MP73] I. MIRSKY, W. PARMLEY, « Assessment of Passive Elastic Stiffness for Isolated Heart Muscle and the Intact Hart », *Circulation Research XXXIII*, 1973, p. 233 - 243.

3.4 Méthode d’“Adéquation Algorithme Architecture”

Participants : Thierry Grandpierre, Rémy Kocik, Christophe Lavarenne, Yves Sorel, Annie Vicard.

Mots clés : contrôle, commande, traitement du signal, traitement d’image, prototypage rapide, co-design, CAO système, langage synchrone, multiprocesseur, parallèle, distribué, temps réel, embarqué.

Résumé : *La méthodologie “Adéquation Algorithme Architecture” (AAA) vise le prototypage rapide et l’implantation optimisée d’applications distribuées temps réel embarquées telles celles rencontrées en commande de systèmes complexes comprenant aussi du traitement du signal et des images. La méthodologie AAA est basée 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, 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, une commande qu’il calcule à partir de son état interne et de l’état de l’environnement, acquis par l’intermédiaire de capteurs. 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), et d’autre part une borne supérieure sur la durée du calcul (latence) entre une détection de variation d’état de l’environnement (stimulus) et la variation induite de la commande (réaction). C’est en ce sens qu’on parle de *systèmes réactifs* ^[BB91] : la commande est calculée en réaction à chaque stimulus. 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, l’architecture doit souvent être *multicomposant*, parallèle, répartie, distribuée, composée de plusieurs processeurs

[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.

et de circuits spécialisés (ASIC¹ figés ou FPGA² reconfigurables, 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 finis" 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 *graphes factorisés*. 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 les plus statiques possibles et/ou "net-lists").

3.4.2 Modèle d'algorithme

Un algorithme tel que défini par Turing et Post est une séquence (ordre total) finie d'opérations directement exécutable par une machine à nombre d'états fini. 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"), et dont l'exécution est conditionnée par une dépendance d'entrée 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 graphe de dépendances, infiniment large mais répétitif, réduit par factorisation à son motif ré-

-
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.

pétitif [LS97], généralement appelé *graphe flot de données*. De plus, chaque partie répétitive du graphe flot de données (“nid 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 communiquant par mémoire partagée alors que le second correspond à un ensemble de processeurs à mémoire distribuée communiquant par passage de messages. Si ces modèles sont suffisants pour décrire, sur une architecture homogène, la distribution et l’ordonnement 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’ordonnement des opérations de communication inter-processeurs souvent critiques pour les performances temps réel.

Pour cela notre modèle d’*architecture multicomposant* hétérogène est un hypergraphe non orienté, dont chaque sommet est une machine à états finie [Gec86], séquenceur d’opérations de calcul ou séquenceur d’opérations de communication, que nous appelons respectivement *opérateur de calcul* et *opérateur de communication*, et dont chaque hyperarc est une ressource partagée entre séquenceurs (mémoire RAM et/ou FIFO, son bus, le multiplexeur d’accès au bus, et l’arbitre du multiplexeur) que nous appelons respectivement *média RAM* et *média FIFO*. Un opérateur de calcul ne peut être connecté qu’à un (des) média(s) RAM, alors qu’un opérateur de communication peut être connecté à des médias RAM et/ou FIFO. L’hétérogénéité ne signifie pas seulement que les opérateurs et les médias peuvent avoir chacun des caractéristiques différentes (durée d’exécution des opérations et taille mémoire des dépendances de données), 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].

En termes plus concrets, notre modèle d’architecture est une extension du modèle classique RTL (“Register Transfer Level”, niveau transfert de registres) [MC80], que nous qualifions de

-
- [LS97] C. LAVARENNE, Y. SOREL, «Modèle unifié pour la conception conjointe logiciel-matériel», *Traitement du Signal* 14, 6, 1997.
 - [Hal93] N. HALBWACHS, *Synchronous programming of reactive systems*, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht Boston, 1993.
 - [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.
 - [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.

Macro-RTL. Une opération du graphe de l'algorithme est une *macro-instruction* (une séquence d'instructions ou un circuit combinatoire); une dépendance de données est 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 calcul de l'architecture, mais aussi des opérations de communication, qui découlent de la première distribution, sur les opérateurs de communication.

La distribution consiste d'une part à affecter chaque opération de l'algorithme à un opérateur de calcul capable de l'exécuter (ce qui conduit à une partition du graphe de l'algorithme), et d'autre part, pour chaque dépendance de données inter-opérateur (c'est-à-dire entre opérations affectées à des opérateurs différents), à choisir une *route* entre les deux opérateurs (chemin dans le graphe de l'architecture), à créer et insérer, entre les deux opérations de l'algorithme, autant d'opérations de communication qu'il y a d'opérateurs de communication sur la route, et à affecter chacune de ces opérations de communication à l'opérateur de communication correspondant. L'ordonnement consiste, pour chaque opérateur, à linéariser (rendre total) l'ordre partiel entre les opérations qui lui ont été affectées, c'est-à-dire à ajouter au graphe de l'algorithme des dépendances d'ordonnement.

Une implantation est donc le résultat d'une transformation du graphe de l'algorithme (ajout des opérations de communication et des dépendances d'ordonnement) en fonction du graphe de l'architecture, lui même transformé (détermination de toutes les routes possibles). L'ensemble de toutes les implantations possibles, étant donné un algorithme et une architecture, est formalisé comme une composition de trois relations binaires : le routage, la distribution et l'ordonnement, chacune d'elles mettant en correspondance des couple de graphes (algorithme, architecture) [VS98]. Chacune de ces implantations possibles a des performances (latences, cadences) différentes. Ces performances sont obtenues par calculs de chemins critiques (latences) et de boucles critiques (cadences) sur le graphe de l'implantation étiqueté par les durées d'exécution caractéristiques des opérateurs de l'architecture.

3.4.5 Optimisation d'implantation

L'adéquation entre un algorithme et une architecture soumis à des contraintes temps-réel et d'embarquabilité, est en général un problème d'optimisation complexe où, pour aboutir à une implantation optimisée à partir d'une spécification initiale, l'algorithme peut subir des transformations plus profondes que celles présentées ci-dessus (changement de granularité ...

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

reformulation complète), et où de plus l'architecture peut aussi subir des transformations (changement du nombre et/ou des caractéristiques des composants).

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.

Le problème d'optimisation que nous avons formalisé [LS93,Sor94], et dont nous avons automatisé la résolution approchée dans le logiciel SynDEx qui supporte la méthode AAA, se limite au cas de l'adéquation entre un algorithme et une architecture donnés, y compris dans leur granularité et leur topologie. Même ainsi réduit, ce problème est reconnu NP-complet, et le nombre d'implantations possibles pour l'algorithme et l'architecture 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 rapides [LC93].

L'heuristique que nous avons développée, de type "list-scheduling", est améliorée pour prendre en compte les communications inter-opérateurs (avec leur distribution et leur ordonnancement sur les routes, donc tenant compte avec précision des routes parallèles et des conflits d'accès aux ressources partagées), l'hétérogénéité des opérateurs et des médias, et le conditionnement des opérations.

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, mis 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

-
- [LS93] C. LAVARENNE, Y. SOREL, «Performance Optimization of Multiprocessor Real-Time Applications by Graph Transformations», *in: Proc. of Parallel Computing 93 Conference*, Grenoble, September 1993.
- [Sor94] Y. SOREL, «Massively Parallel Systems with Real Time Constraints: the "Algorithm Architecture Adequation" methodology», *in: Proc. of the Conf. on "Massively Parallel Computing Systems, the Challenges of General-Purpose and Special-Purpose Computing Conference"*, Ischia Italy, May 1994. overall overview of AAA methodology with focus on Macro-RTL architecture model and on implementation model.
- [LC93] Z. LIU, C. CORROYER, «Effectiveness of heuristics and simulated annealing for the scheduling of concurrent task. An empirical comparison», *in: PARLE'93, 5th international PARLE conference, June 14-17*, p. 452-463, Munich, Germany, novembre 1993.
- [GLS98] T. GRANDPIERRE, C. LAVARENNE, Y. SOREL, «Modèle d'exécutif distribué temps réel pour SynDEx», *Rapport de Recherche n° 3476*, INRIA, août 1998.

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 *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).

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 :

- *les futurs systèmes embarqués de contrôle distribué pour automobiles (problèmes de programmation de tâches de commande sur un réseau de micro-contrôleurs),*
- *les SOC (System On a Chip) utilisés dans les télécommunications et bientôt sans*

doute dans d'autres domaines.

4.2 Automatique, Informatique et Automobile

Résumé : *Ce domaine concerne actuellement, dans le cadre de la coopération avec Renault, les projets Meta2, Pampa, Promath, Sigma2, Sosso et dans un cadre "Post Praxitele" consacré aux véhicules électriques, Bip, Icare, Sharp, Sosso . . . On ne décrit ici que les grandes lignes de la coopération avec Renault qui donne lieu à un accord cadre. Pour résumer, on peut dire que les recherches concernent, 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.*

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 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, . . .); anti-vol; véhicule électrique ou hybride.

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

4.2.2 Les sujets de recherche

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

1. La réduction de la pollution et de la consommation des moteurs thermiques imposée par les futures normes. Les espoirs d'amélioration sont importants, ce qui fait que ce type de moteurs

a sans doute encore de l'avenir, même si les solutions de substitution (moteurs électriques, à hydrogène ...) progressent. Ces espoirs viennent en général de progrès technologiques : nouveaux moteurs (injection directe essence ou diesel), nouveaux pots catalytiques pour mélanges pauvres, nouveaux capteurs de richesse des gaz ...

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

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

4.3 Automatique, Traitement du signal et Génie biomédical : modélisation du système cardio-vasculaire et de sa régulation par le système nerveux autonome. Application à la clinique

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-vasculaire et sa régulation par le système nerveux autonome. Ces études conduisent à des outils pour les applications à la clinique.*

4.3.1 Traitement des signaux physiologiques

Description externe du système cardio-vasculaire. Les signaux physiologiques sont des fenêtres d'accès au système cardio-vasculaire (SCV) et à son contrôle par le système nerveux autonome (SNA). Ils permettent une approche descriptive, spéculative, du fonctionnement du SCV et du SNA, à travers l'étude du rythme cardiaque, de la pression artérielle, de la respiration et de leur adaptation à des conditions physiologiques (motilité, états veille-sommeil, orthostatisme ...) ou pathologiques. Cette approche est enrichie et confirmée par les effets d'agents pharmacologiques (ou interventions chirurgicales) sur les indicateurs issus de l'analyse. Les variables observables sont des indicateurs du bon fonctionnement du système : en particulier, les variations de haute fréquence du rythme cardiaque et de la pression artérielle, expriment l'influence de la respiration, les variations de basse fréquence expriment l'activité des baroréflexes, contrôlés par le SNA.

Méthodes de traitement du signal. Ces variables observables sont directement accessibles par des méthodes de traitement du signal ; méthodes de détection d'événements sur les signaux bruts (intervalles RR et QT à partir de l'ECG . . .) et méthodes d'analyse, spectrales et temps-fréquence adaptées aux signaux non stationnaires, comme la démodulation complexe modifiée et la transformation de pseudo Wigner-Ville lissée. Les relations entre les rythmes sont étudiées par des évaluations de cohérence et gains. Ces méthodes ont été implémentées dans LARY_CR (voir la section 5.1).

4.3.2 Description interne du système cardio-respiratoire et modélisation des mécanismes de régulation

Motivations. Permettre le **traitement de grosses quantités d'informations** : l'identification des paramètres du modèle peut fournir des informations synthétiques qui ne sont pas données directement par les signaux recueillis. Certains paramètres ayant un sens physique particulier peuvent fournir des **indicateurs** de bon fonctionnement. Des indicateurs déjà utilisés (comme la sensibilité du baroréflexe) sont ainsi évalués numériquement de façon plus précise, ou mieux compris dans le cadre d'un modèle à base physiologique.

L'utilisation du modèle en **simulation** permet de faire de la prédiction de comportement qualitatif ou quantitatif et peut donc être intéressant dans l'enseignement.

De plus, grâce à l'aide de systèmes de monitoring, on peut suivre en temps réel certains indicateurs du système décrit et donc fournir aux cliniciens un outil de **surveillance / diagnostic**. Enfin, le but final de la modélisation d'un système du point de vue de la commande est d'obtenir des points d'entrée, en particulier pharmacologiques, qui permettent de modifier son comportement dans un sens souhaité et donc de proposer des **stratégies thérapeutiques**.

Le sous-système cardio-vasculaire. Le cœur est une double pompe qui permet de faire circuler le sang à travers le circuit vasculaire. Le volume sanguin total est réparti en deux circuits : pulmonaire, ou petite circulation, dans lequel pompe le cœur droit, et systémique, ou grande circulation, dans lequel pompe le cœur gauche. Ces deux pompes sont synchronisées par un pacemaker naturel : le nœud sinoatrial qui donne l'ordre de pompage aux deux cœurs à la fréquence cardiaque.

Chacune des deux circulations est à son tour divisée en un compartiment artériel et un compartiment veineux, entre lesquels ont lieu les échanges gazeux au niveau des capillaires pulmonaires ou systémiques. La principale mission du système cardio-vasculaire (SCV) est en effet de faire circuler le sang dans le système vasculaire pour alimenter en oxygène les tissus de l'organisme et d'éliminer le gaz carbonique qui y est produit par la combustion des nutriments (glucose, notamment).

Cela nécessite, d'une part, un débit cardiaque, d'autre part, un volume sanguin systémique suffisants. Le débit du ventricule gauche et le volume sanguin systémique (et donc le rapport du volume du compartiment systémique sur le volume total, systémique et pulmonaire) sont les grandeurs régulées du système et dépendent de la pression artérielle, seule variable avec la pression veineuse centrale pour laquelle on connaît des capteurs.

La boucle de régulation à court terme de la pression artérielle a été identifiée comme étant l'**arc baroréflexe**, dans lequel le **système nerveux autonome (SNA)** est le **contrôleur**

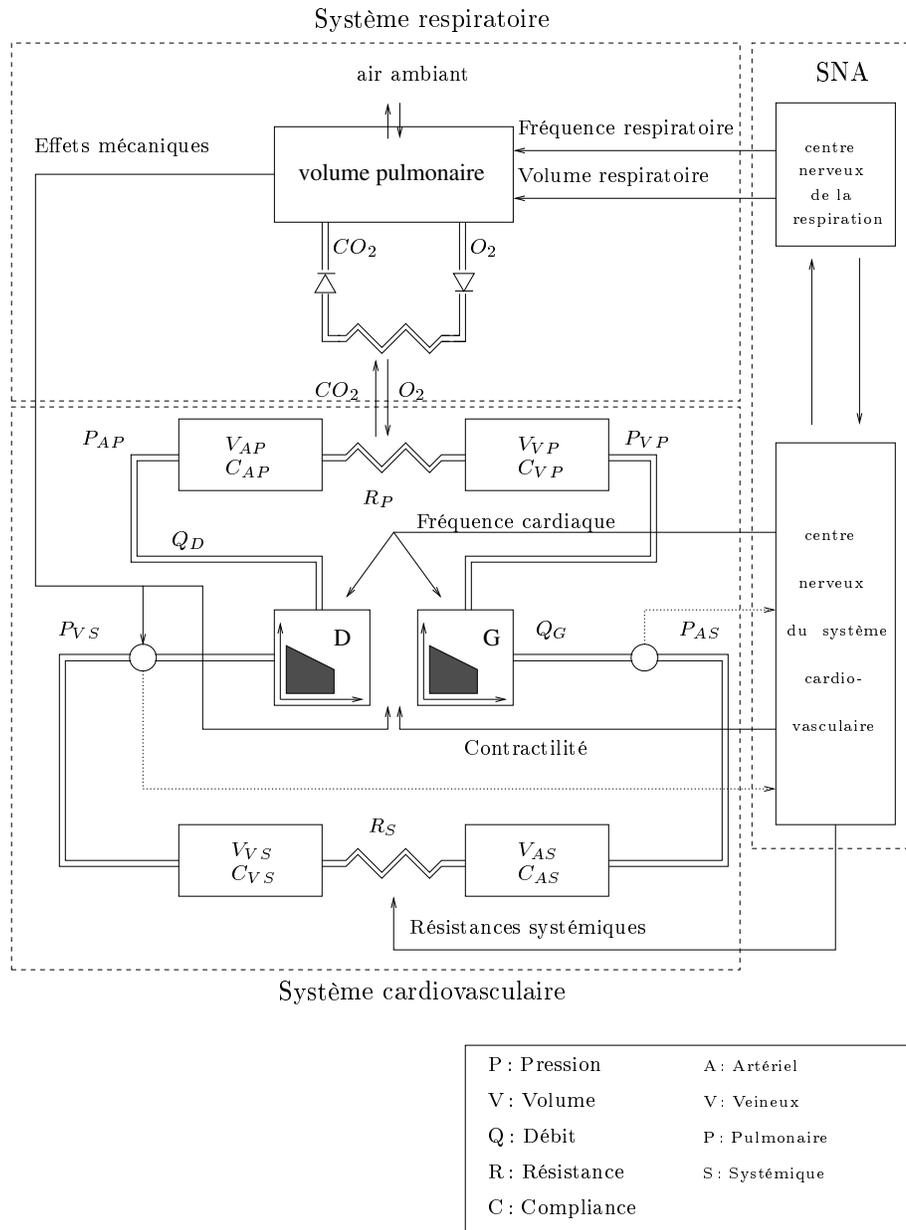


FIG. 4: *Modèle du système cardio-respiratoire.*

et le **barorécepteur** artériel le **capteur** principal. La pompe cardiaque en est 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.

Effets du SNA : les entrées contrôlées du SCV. Les messages nerveux codés en fréquence en provenance des barorécepteurs (artériels, mais aussi veineux) sont transmis aux centres nerveux autonomes du bulbe et de la moelle épinière, d'où partent en retour deux types de 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).

Caractéristiques de la modélisation du SCV. Le modèle se compose de deux pompes, cœurs droit et gauche ; quatre compartiments sanguins (systémique et pulmonaire, artériel et veineux) ; un contrôleur central, le SNA. Les modèles de base utilisés sont :

- un modèle "de type Hill" pour la fibre musculaire cardiaque, étendu aux ensembles de fibres que sont les ventricules (les deux pompes) est utilisé pour représenter la courbe pression-volume de chaque ventricule (voir la section 3.3).
- un modèle de type "windkessel" pour chacun des compartiments vasculaires : cellule $R - C$ (équation différentielle du premier ordre), où C représente la compliance, et R la résistance à l'écoulement du sang (plus une impédance mécanique, notamment pour l'aorte) ;
- des valves entre pompes et compartiments vasculaires, en entrée comme en sortie (on annexe les oreillettes aux compartiments veineux correspondants, négligeant ainsi les effets mécaniques de la contraction auriculaire), soit quatre valves au total ;
- un oscillateur modulé en fréquence, commandant les raideurs de l'élément contractile du modèle de Hill, et représentant le pacemaker cardiaque ;
- un modèle de type sigmoïdal avec hystérésis, pour le SNA, transformant le signal de pression en provenance des barorécepteurs en un signal nerveux sympathique et un autre parasympathique (chacune de ces deux voies présentant une constante de temps et un retard distincts) à destination des cibles décrites plus haut.

Le sous-système respiratoire. La respiration consiste en un échange gazeux entre l'organisme et le milieu ambiant. L'origine des échanges gazeux entre les alvéoles et l'air ambiant tient à la différence des pressions qui existent entre ces deux milieux. Pour réaliser ces différences nécessaires, le volume pulmonaire doit augmenter lors de l'inspiration et diminuer lors de l'expiration. Ceci est assuré, d'une part, directement par les mouvements du diaphragme, et, d'autre part, indirectement grâce aux autres muscles respiratoires qui agissent sur la cage thoracique. Grâce aux mouvements respiratoires, l'oxygène parvient par l'air inhalé dans les alvéoles pulmonaires d'où il diffuse dans le sang. Au niveau des alvéoles pulmonaires les échanges gazeux se font par diffusion, autrement dit le gaz carbonique parvient du sang de l'artère pulmonaire aux alvéoles tandis que l'oxygène diffuse des alvéoles dans le sang des capillaires pulmonaires.

La principale mission du système respiratoire (SR) est en effet de fournir l'oxygène et d'éliminer le gaz carbonique. Cela nécessite, d'une part, un débit cardiaque, d'autre part un débit d'oxygène et de gaz carbonique suffisants. En ce qui concerne le système respiratoire les flux entrant d'oxygène et sortant de gaz carbonique sont les grandeurs réglées du système et dépendent de la fréquence et du volume respiratoires. Dans la boucle de régulation de la pression partielle d'oxygène, le SNA joue le rôle de contrôleur, les chémorécepteurs sont les capteurs principaux et les muscles respiratoires les actionneurs.

Effets du SNA : les entrées contrôlées du SR. Le contrôle de la respiration spontanée par le système nerveux central est sous l'influence des centres respiratoires situés au niveau de la région médullo-pontique. Ces centres bulbaires, une fois reçu le message nerveux en provenance des chémorécepteurs, modulent la profondeur de l'inspiration et le point de rupture de la fin de l'inspiration, générant ainsi l'activité rythmique respiratoire.

Interactions entre le SCV et le SR. La respiration module le rythme cardiaque et la pression artérielle :

- par une modification de la pression veineuse due au “pompage diaphragmatique” : l'abaissement du diaphragme à l'inspiration agit comme une pompe de flux veineux de la périphérie vers le cœur augmentant le débit veineux instantané du sang revenant au cœur droit.
- par une interaction directe entre le centre nerveux respiratoire et le centre nerveux du système cardiovasculaire.

Caractéristiques de la modélisation du SR. Les modèles de base utilisés sont :

- un modèle des fibres des muscles inspiratoires et expiratoires semblable à celui utilisé pour le cœur ;
- un modèle linéaire pour l'équation d'étirement des poumons, mais avec une relation statique pression-volume continue par morceaux ;
- un oscillateur modulé en fréquence et en amplitude représentant le générateur de l'activité rythmique respiratoire. Ce point est approfondi dans la section suivante 4.3.3

4.3.3 Modélisation et simulation du réseau neuronal rythmogène embryonnaire à l'origine du rythme respiratoire

Dans le cadre des couplages activateurs-inhibiteurs qui sont bien souvent à l'origine de rythmes biologiques endogènes, ce thème de recherche concerne l'étude du réseau neuronal rythmogène du tronc cérébral embryonnaire. Des résultats expérimentaux récents chez certains embryons ont mis en évidence des structures neuronales primordiales qui sont à l'origine du rythme respiratoire et permettent d'expliquer sa modulation. Il est à noter que l'organisation neuronale mise en place chez l'embryon reste vitale à la naissance : une modification du réseau embryonnaire par mutagenèse dirigée produit des syndromes respiratoires létaux à la naissance (apnées du nourrisson, hypoventilation chronique). Le but de cette recherche est de proposer et de valider des hypothèses concernant l'action neuromodulatrice et de fournir une possible modélisation de la commande nerveuse de la respiration automatique.

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

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 urbain électrique 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 et QT sur l'ECG, systolique et diastolique sur la pression artérielle) puis analyse temporelle et fréquentielle des rythmes résultants. LARY_CR propose des applications médicales ciblées et facilement modifiables sur la base de méthodes de traitement du signal en bibliothèque ; citons par exemple l'étude des interactions cardio-respiratoires dans l'épreuve physiologique du test de verticalisation chez des sujets contrôles ou insuffisants cardiaques (voir la section 6.3.5 Applications cliniques). 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 : Thierry Grandpierre, Rémy Kocik, Christophe Lavarenne, Yves Sorel [correspondant], Annie Vicard.

SynDEx

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. Le codage de l'implantation est généré automatiquement à partir de bibliothèques extensibles et portables, sous la forme d'un exécutif pour chaque processeur (en assembleur ou en C, Fortran ...), et d'une "net-list" pour chaque circuit spécialisé (en VHDL ...). SynDEx produit un exécutif optimisé principalement statique pour des architectures multiprocesseur à base de stations de travail UNIX, de processeurs i80386, de Tranputers, 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 la page web <http://www-rocq.inria.fr/syndex>.

Diffusion de SynDEx

La version 5.1, avec générateur d'exécutif pour architectures cibles hétérogènes et noyau d'exécutif pour réseau de stations de travail sous C-UNIX-TCP/IP, est maintenant chargeable 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.*

Participants : Pierre-Alexandre Bliman, Alexander Krasnosel'skii.

Mots clés : système de Lur'e, oscillation non linéaire, solution périodique, critère de stabilité de Popov.

Nous avons continué l'étude de la stabilité des systèmes avec nonlinéarités vérifiant une condition de secteur. Les efforts ont particulièrement porté cette année sur les systèmes à retard. Un critère fréquentiel de stabilité généralisant celui de Popov aux cas de systèmes avec nonlinéarités instationnaires a été obtenu. Il suppose une condition de type secteur sur la dérivée de la nonlinéarité par rapport au temps (soit une limitation du *taux de variation du gain*

dans le cas des systèmes linéaires instationnaires). Via le lemme positif réel, les hypothèses s'expriment pour des systèmes rationnels sous forme de systèmes d'inégalités matricielles linéaires (LMI). Ceci offre une possibilité de mise en œuvre numérique pour les systèmes à retards, en utilisant des approximations rationnelles des transferts.

L'approche par fonctionnelle quadratique de Lyapunov-Krasovskii a également permis d'obtenir un critère de stabilité indépendant de la valeur du retard, en supposant le même type de restrictions sur les variations de la nonlinéarité. Les résultats sont ici plus conservatifs, mais la complexité des calculs est moindre, puisque la stabilité est testée directement par la résolution d'une LMI, sans avoir à approximer le transfert. Une comparaison de résultats numériques obtenus par les critères dépendant et indépendant du retard a été faite, montrant que ces derniers sont systématiquement plus faibles.

6.2 Systèmes non linéaires à retards

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 : Catherine Bonnet, Jonathan Partington, Michel Sorine.

Mots clés : commande robuste, retard, saturation, signe, boucle à verrouillage de phase, PLL, systèmes linéaires fractionnaires, facteurs de Bézout.

6.2.1 Commande robuste de systèmes non linéaires à retards

Nous étudions la commande robuste de systèmes à retards qui sont équipés de capteurs et actionneurs linéaires et non linéaires, les non linéarités étant de type signe (modèle élémentaire d'une sonde de richesse des gaz tout-ou-rien, dite sonde lambda que nous rencontrons dans nos applications) ou saturation.

Ce problème est posé dans un cadre entrée-sortie L_∞ dans lequel différentes notions de stabilité sont considérées à partir des différentes normes ou fonctions de gain définies pour les opérateurs non linéaires (définitions qui deviennent équivalentes dans le cas des opérateurs linéaires).

6.2.2 Commande robuste de systèmes linéaires fractionnaires

Nous avons considéré la stabilisation robuste de systèmes linéaires fractionnaires du type :

$$P(s) = \frac{q_0(s) + \sum_{i=1}^{i=n_2} q_i(s) e^{-\beta_i s^r}}{p_0(s) + \sum_{i=1}^{i=n_1} p_i(s) e^{-\gamma_i s^r}} = \frac{h_2(s)}{h_1(s)}$$

où r est un réel qui vérifie $0 < r < 1$, les p_i sont de la forme $\sum_{k=0}^{l_i} a_k s^{\alpha_k}$ avec $\alpha_k \in \mathbb{R}^+$ et les q_i sont de la forme $\sum_{k=0}^{m_i} b_k s^{\delta_k}$ avec $\delta_k \in \mathbb{R}^+$.

Nous avons imposé la condition $\deg p_0 > \deg q_0$ pour ne traiter que les systèmes strictement propres mais le cas des systèmes propres peut facilement être ramené à cette étude.

De plus, nous avons supposé que h_2 et h_1 n'ont pas de zéro commun dans $\{\Re s > 0\}$.

Nous avons montré que la condition “ P n'a pas de pôles dans $\{\Re s \geq 0\}$ ” est (nécessaire et) suffisante pour que le système soit BIBO stable et même nucléaire (i.e la série des valeurs singulières de l'opérateur de Hankel associé au système est convergente). Cette propriété de nucléarité est intéressante pour l'approximation des systèmes.

Nous avons ensuite déterminé des factorisations coprimales et facteurs de Bézout pour ces systèmes ce qui permet le calcul de contrôleurs stabilisants robustes.

Nous étudions actuellement les propriétés de stabilité des systèmes fractionnaires à retards du type:

$$P(s) = \frac{q_0(s) + \sum_{i=1}^{i=n_2} q_i(s)e^{-\beta_i s}}{p_0(s) + \sum_{i=1}^{i=n_1} p_i(s)e^{-\gamma_i s}}$$

où les polynômes p_i et q_i sont de degré strictement inférieur à $\deg p_0$.

6.2.3 Commande de systèmes à retard avec sortie tout-ou-rien

Participants : Marianne Akian, Sophie Bismuth, Pierre-Alexandre Bliman, Leonid Fridman.

Mots clés : cycle-limite, retard, fonction signe, proportionnel intégral.

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 acteurs “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 paru 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.

Un résultat intéressant a été obtenu par Ivanov et Losson. Pour un système obtenu à partir du précédent en changeant la fonction sgn en une nonlinéarité constante par morceaux non antisymétrique et non monotone, ces auteurs ont prouvé l'existence d'une solution périodique rapide. Nous avons commencé à étudier le cas d'une nonlinéarité antisymétrique mais non monotone. De manière surprenante, il semble que tous les cycles rapides soient instables.

6.3 Modélisation et analyse de la régulation des systèmes cardio-vasculaire et cardio-respiratoire par le système nerveux autonome. Applications cliniques

Participants : Julie Bestel, Jean Clairambault, Daniel Claude, Mayer Landau, Laurence Mangin, Claire Médigue, Alessandro Monti, Michel Sorine.

Mots clés : pacemaker, Van-Capelle et Dürrer, onde de Mayer, SNA, mécanique du myocarde, rythme cardiaque, QT, inhibition du SNA, stimulation du SNA.

Résumé : *La modélisation en électrophysiologie cardiaque, au niveau cellulaire, a continué avec l'étude du couplage cellule pacemaker-cellule non-pacemaker. L'étude de modélisation mécanique du myocarde a continué. Elle a pour principal objectif de mieux interpréter les mesures de pression artérielle et d'ECG. Elle a conduit à un nouveau modèle de contraction musculaire. Après l'étude des ondes de Mayer, notre étude du rythme cardiaque s'appuie maintenant sur un modèle élémentaire du système cardio-respiratoire, pour rendre compte de l'influence de la respiration. Enfin plusieurs études cliniques sont menées sur le SNA et le sommeil, l'insuffisance cardiaque ...*

6.3.1 Détection d'événements sur l'électrocardiogramme

Ce travail est réalisé dans le cadre de l'ARC CARDIO. La validation d'un algorithme de détection d'événements sur l'électrocardiogramme s'est poursuivie en collaboration avec le projet Sigma2 et l'Université Paris VIII. Une partie "détection d'événements sur le signal de pression artérielle" a également été ajoutée, complétant ainsi cet algorithme de façon à obtenir à chaque battement cardiaque une pression artérielle systolique (PAS) et une pression artérielle diastolique (PAD).

6.3.2 Modélisation en électrophysiologie cardiaque

Ce travail de M. Landau se situe dans le cadre de l'électrophysiologie cardiaque. On utilise, pour modéliser la génération du potentiel d'action cardiaque, le modèle d'équations différentielles de Van Capelle et Dürrer qui dans le passé nous a fourni des résultats théoriques confirmés, a posteriori, par l'expérimentation biologique.

Du point de vue mathématique on utilise les méthodes de continuation-bifurcation et l'étude de la stabilité de solutions stationnaires et périodiques. Les résultats concernent la cellule non-pacemaker (NPM) *isolée*, et le couplage de deux cellules NPM *identiques*.

On part de la cellule NPM isolée, avec un courant constant I , ajouté au deuxième membre de l'équation en potentiel. Ce courant correspond à un courant de fuite venant de cellules "blessées" voisines. Une étude de continuation-bifurcation de ce système par rapport à I permet de mettre en évidence, de part et d'autre d'un point de bifurcation de Hopf, deux zones paramétriques en I adjacentes. Dans la première zone coexistent une solution stationnaire et une solution périodique stable. Dans la deuxième zone coexistent deux solutions stationnaires stables. Une étude des bassins d'attraction de ces solutions permet de réaliser des simulations où l'on montre que de très petites fluctuations de I ou/et des conditions initiales font osciller le système entre ces quatre solutions. On interprète ce résultat dans le cadre des troubles du rythme cardiaque.

On couple alors deux cellules NPM *identiques*. Pour une résistance de couplage R fixée, on mène une étude de continuation-bifurcation par rapport à I de ce nouveau système. On retrouve, comme solution, la solution symétrique correspondant pour chaque cellule au comportement de la cellule isolée. Le point intéressant est qu'on détermine également sur la branche de solution symétrique stationnaire deux points de bifurcation, reliés par deux branches bifurquées. Une étude de stabilité sur ces branches bifurquées permet de montrer l'existence de solutions *asymétriques* stables. Un examen global du diagramme de bifurcation du système permet ainsi de déterminer une zone paramétrique en I où coexistent quatre solutions stables. Deux solutions *symétriques* et deux solutions *asymétriques*. On étudie les bassins d'attraction de ces différentes solutions. Cette étude permet de simuler des situations où, partant d'une solution asymétrique stable :

- une dépolarisation appliquée à la première cellule conduit à un potentiel d'action propagé à la seconde cellule. Ceci correspond à une convergence du système vers la solution symétrique haute,
- la *même dépolarisation* appliquée à la seconde cellule conduit à un bloc, correspondant à une convergence du système vers la solution symétrique basse.

Ce résultat donne une explication possible à la notion de bloc unidirectionnel, largement mal comprise en cardiologie et pourtant "brique" fondamentale de nombreux troubles du rythme cardiaque (réentrée).

Une réflexion est menée actuellement avec les biologistes (en particulier A. Bardou de l'Inserm) sur la mise en place d'un dispositif expérimental permettant de confirmer ce type de résultat.

6.3.3 Étude théorique des ondes de Mayer et sensibilité de l'arc baroréflexe.

Les ondes de Mayer : un cycle limite dû à des non linéarités du SNA. Ce travail est réalisé dans le cadre de l'ARC CARDIO. Le système cardio-vasculaire (SCV) contrôlé par le système nerveux autonome (SNA) constitue, pour l'automatisme, un système en boucle fermée : 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. $P_a \rightarrow \dot{\phi}$ constitue un modèle de l'"arc baroréflexe". L'analyse faite,

les années passées, 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. Cela constitue un indicateur possible de l'état du SNA, dont nous continuons la validation expérimentale.

La méthode numérique d'estimation de cette "sensibilité" du baroréflexe mise au point précédemment est utilisée ; le gain dans la zone d'énergie de haute fréquence (HF) liée à la respiration, a été étudié également. On a pu tester l'indicateur, rapport des deux gains en HF et BF, de l'activité du SNA impliquée dans la régulation à court terme de la pression artérielle ; cette méthode a donné lieu à des applications en physiologie, en clinique et en pharmacologie (cf. 6.3.5).

6.3.4 Modélisation mécanique du myocarde.

Ce travail est réalisé dans le cadre de l'ARC CARDIO. Nous avons poursuivi le travail de modélisation du myocarde (voir la section 3.3). Le modèle de Mirsky et Parmley (équation (8)) 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 σ_x reste constant. Ce modèle n'est donc utilisable que pour les éléments passifs parallèle et série. Pour pallier cet inconvénient nous avons cherché un modèle décrivant l'évolution de la force et de l'énergie interne du muscle en adaptant une approche proposée par Zahalak [Zah86]. 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.

Cette démarche a abouti : nous disposons maintenant d'un modèle pour l'élément contractile compatible à la fois avec le modèle, au niveau microscopique, dit du "filament glissant de Huxley", et, au niveau macroscopique, avec les observations à l'origine du modèle de Mirsky et Parmley. Il s'écrit ainsi [45] :

$$\begin{cases} \dot{K}_c = -a(|\dot{\epsilon}_c| + u)K_c + bu \\ \dot{\sigma}_c = K_c \dot{\epsilon}_c - a(|\dot{\epsilon}_c| + u)\sigma_c + \frac{b}{2}u \end{cases} \quad (10)$$

Ce système de deux équations différentielles du premier ordre couplées décrit l'évolution de la raideur K_c et de la contrainte σ_c , connaissant la vitesse de déformation $\dot{\epsilon}_c$ et une vitesse de réaction chimique u (elle-même liée à la vitesse du front d'activation) qui joue le rôle

[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.

[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.

de commande (sous l'influence du SNA). Il rend compte de phénomènes qualitatifs clés : 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 (deux ventricules + quatre compartiments sanguins + vaisseaux) et programmé dans SCICOS. Son comportement est en cours d'étude.

6.3.5 Applications cliniques en cours en 1999

Toutes ces applications évaluent le comportement du SNA à travers l'étude des rythmes cardio-vasculaire et respiratoire.

Changements d'état du SNA au cours du sommeil dans un groupe de 12 adultes sains. Les stades de sommeil et de veille intra-sommeil sont déterminés par des critères électro-encéphalographiques, électro-oculographiques et électro-myographiques ; ils sont sous l'influence de structures de contrôle cérébrales différentes. On a étudié les différences de comportement des variables cardiovasculaires en fonction de ces stades, sous un régime respiratoire stable. Collaboration avec le Service des Explorations Fonctionnelles (Pr Escourrou, Hôpital Antoine Bécèle, Clamart) (voir [48]).

Influence des modifications de fréquence respiratoire sur le SNA chez des Insuffisants Cardiaques. Ce travail est réalisé dans le cadre de l'ARC CARDIO. L'insuffisance cardiaque, décrite comme une "inondation" de l'organisme par les cathécholamines, s'accompagne de troubles importants du fonctionnement du SNA, dont les récepteurs sont saturés. On a évalué l'influence de la respiration sur l'évolution du gain baroréflexe étudié les années précédentes, en faisant varier la fréquence respiratoire de 0.25 Hz à 0.15 Hz. Dans la zone d'entraînement de la respiration vers les basses fréquences, à 0.15 Hz, les gains entre pression artérielle et rythme cardiaque sont modifiés par rapport au sujet sain. Collaboration avec le Dr. Laurence Mangin, Unité INSERM 127 et service de pharmacologie clinique, Hôpital Henri Mondor (voir [41]).

Comportement du SNA sous l'influence de drogues inhibitrices chez 14 jeunes adultes sains. L'objectif est l'analyse de la composante parasympathique (ou vague) 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. Collaboration avec le Pr. JL. Elghozi, laboratoire de Pharmacologie, Hôpital Necker (voir [51]).

Comportement du SNA au cours du test physiologique de verticalisation (tilt-test) chez des sujets présentant des syncopes vasovagales. Cette pathologie est responsable de pertes de connaissances à répétition, se caractérisant par une exagération du réflexe physiologique de stimulation parasympathique et du réflexe d'inhibition sympathique ; l'étiologie en

est encore mal connue et serait probablement liée à la déficience de la réponse à un changement de la capacité systémique veineuse (voir aussi le paragraphe qui suit). Cette application entre dans le cadre de deux collaborations :

- Étude de 12 sujets porteurs d'un stimulateur cardiaque, pour syncopes récurrentes : le tilt induit une syncope chez la moitié d'entre eux ; le comportement de la variabilité cardiaque et du signal de contractilité cardiaque en amont de la syncope sont très significativement différents entre les deux groupes, mettant en évidence des degrés différents dans la réponse du SNA. Collaboration avec le Dr. L. Mangin (voir [50]).
- Étude comparative de sujets à syncopes récurrentes non encore implantés et de sujets contrôles. Collaboration avec le Dr. J.C. Deharo, service de cardiologie de l' Hôpital Sainte-Marguerite, Marseille.

Application des modèles : indice de contractilité du myocarde et stimulation cardiaque. Ce travail est réalisé dans le cadre de l'ARC CARDIO. Nous sommes entrés en contact avec l'entreprise SORIN-BIOMEDICA, qui commercialise un stimulateur cardiaque (LIVING) accompagné d'une sonde (BEST), implantée dans le ventricule droit, qui délivre en continu une mesure d'accélération de la paroi. À chaque battement cardiaque, au cours de la phase de contraction isovolumétrique, le maximum de la valeur crête à crête de l'accélération est délivrée : il s'agit du PEA (Peak Endocardial Acceleration). Plusieurs études ont montré que cette mesure est fortement corrélée à la dérivée maximale de la pression intra-ventriculaire au cours du temps ; pour cette raison, le PEA est susceptible de fournir un indice de la contractilité du myocarde.

a) Validation du modèle dans la phase isovolumique et PEA. Nous proposons une expression littérale du PEA en considérant les instants d'extrema de l'accélération pendant la phase de contraction isovolumique [45] : le ventricule est alors isolé de l'extérieur, son volume est constant. Nous trouvons que PEA est affine en la dérivée de la pression intra-ventriculaire, ce qui est une explication possible des corrélations évoquées plus haut. Il dépend aussi de la pression, de la commande u et de paramètres ayant un sens physique dans notre modèle. Cette expression est en cours de validation à partir de données réelles, fournies par le docteur J. C. Deharo, obtenues lors de l'implantation d'un stimulateur chez un patient victime de syncopes vaso-vagales. Pour l'instant, nous travaillons sur la partie de l'enregistrement pendant laquelle le SNA du patient est bloqué pharmacologiquement, ce qui permet de considérer l'amplitude et la fréquence de la commande u constantes.

b) Modélisation d'une pathologie : la syncope vaso-vagale. Un patient atteint de cette maladie a 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 (voir paragraphe précédent). Actuellement, l'explication la plus largement acceptée est la suivante : chez chacun de nous, 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 bradychardie), 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. De plus, la mesure de PEA, en tant que reflet de la contractilité, permet de déclencher la stimulation artificielle juste avant la syncope.

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 et avec SORIN-BIOMEDICA.

6.4 Schéma chronopharmacologique théorique pour corriger un cycle altéré : exemple de la protéine PER chez la Drosophile

Participants : Jean Clairambault, Daniel Claude.

Résumé : *Un système dynamique à temps continu prenant pour base des équations de la cinétique chimique et modélisant les oscillations d'une variable biologique est pris pour exemple d'un mécanisme général de régulation physiologique. Un tel cadre théorique permet de modéliser le déplacement de cycles limites pathologiques vers des zones physiologiques par une action pharmacologique ; ce travail a pour objet de fournir au clinicien de nouvelles stratégies thérapeutiques fondées sur ce principe.*

Ce travail est mené dans le cadre du programme de recherche "Automatique, Biologie et Santé", soutenu par le GDR-PC AUTOMATIQUE.

Les oscillations circadiennes de la protéine PER chez la Drosophile ont été récemment décrites par A. Goldbeter à l'aide d'un modèle non linéaire de dimension 5 [Gol95, Gol96]. Ce modèle a la particularité d'associer à un unique paramètre, représentant le taux de dégradation maximum de la protéine PER, différents mutants de Drosophile caractérisés, entre autres, par des périodes endogènes de production de la protéine PER différentes de celle de l'insecte sauvage.

Faute de thérapie génique, nous avons modifié un autre paramètre qui, lui, semble accessible, au moins en théorie, et qui représente le taux de traduction de l'ARN-messager en la

[Gol95] A. GOLDBETER, «A model for circadian oscillations in the *Drosophila* period protein (PER)», *Proc. R. Soc. Lond. B*, 1995, p. 319–324.

[Gol96] A. GOLDBETER, *Biochemical oscillations and cellular rhythms*, Cambridge University Press, Cambridge, U.K., 1996.

forme non phosphorylée de la protéine PER. Au plan du paradigme, l'idée sous-jacente est d'utiliser les schémas d'administration usuels en pharmacocinétique pour déplacer le rythme endogène des différents mutants afin d'obtenir un rythme résultant proche du rythme endogène de l'insecte sauvage. De plus, dans le dessein d'obtenir une loi de commande, qui bien qu'elle soit en boucle ouverte, possède des qualités de robustesse vis-à-vis des erreurs en amplitude, en phase et en période, nous avons montré qu'une solution consiste à utiliser un schéma d'administration intermittent périodique, activateur ou inhibiteur, à même de réaliser un entraînement 1-1 du modèle, ramenant ainsi le cycle de production de la protéine PER de 28,5 h ou 16 h, selon le mutant considéré, à 24 h [22, 21, 36, 34, 31].

De plus, nous avons montré que cet entraînement est robuste au sens suivant : il persiste dans toute une zone du couple de paramètres (amplitude de la stimulation, durée effective de la stimulation) suggérant la possibilité d'une "loi des aires", le produit de l'amplitude par la durée effective (i.e. la dose totale quotidienne) étant astreint à varier dans un "intervalle d'efficacité" pour obtenir l'entraînement. Le choix d'un couple de paramètres admissible n'est pas indifférent, et se traduit, pour une même valeur de la dose totale administrée, par des différences dans la phase du pic de production de la protéine PER.

Ceci suggère comment, dans d'autres contextes, certaines pathologies associées à une modification de rythmes pourraient être traitées par l'administration périodique d'agents pharmacologiques spécifiques. En particulier, dans le cadre de la chronothérapie anti-cancéreuse, on tente de définir les paramètres optimaux de chronomodulation de la chimiothérapie en fonction des caractéristiques des rythmes propres de l'individu ou des cellules tumorales, caractéristiques qu'il est nécessaire de modifier dans certaines conditions par l'administration de substances aux effets spécifiques [36, 33, 35].

6.5 Modélisation et commande de la fonction ovarienne

Participants : Daniel Claude, Frédérique Clément.

Ce travail est mené dans le cadre du programme de recherche "Automatique, Biologie et Santé", soutenu par le GDR-PC AUTOMATIQUE. Il a fait l'objet de la thèse de Frédérique Clément maintenant recrutée à l'Inria.

La fonction ovarienne chez les mammifères est un processus bien décrit pour lequel il existe des modélisations mathématiques à même de fournir des explications plausibles aux situations biologiquement observées. Il en est ainsi pour l'évolution de la composition cellulaire de la granulosa au cours du développement terminal des follicules jusqu'à l'ovulation. Il est en outre possible de proposer une explication d'origine dynamique au syndrome des ovaires polykystiques qui est à l'origine des trois quarts des cas d'infertilité par anovulation chez la femme. Compte tenu de l'influence bien connue des deux hormones LH (hormone lutéinisante) et FSH (hormone folliculo-stimulante) dans les processus de développement folliculaire et d'ovulation, ces deux hormones sont considérées comme des entrées de commande agissant sur les cellules folliculaires et les conséquences de leur action sur la production d'AMP-cyclique définissent une relation entrée-sortie. Ceci fait l'objet des recherches actuelles et a donné lieu à une modélisation par un système dynamique non linéaire.

6.6 Méthode d'“Adéquation Algorithme Architecture”

Participants : Ailton Dias, Rachid Djenidi, Thierry Grandpierre, Rémy Kocik, Christophe Lavarenne, Tony Noël, Mihaela Sighireanu, Yves Sorel, Annie Vicard.

Résumé : *Amélioration de la précision des modèles d'algorithme et d'architecture avec introduction de la hiérarchie. Améliorations de l'heuristique d'optimisation pour une meilleure prise en compte du conditionnement, des contraintes temps réel multiples et des aspects dynamiques de l'exécutif. Synthèse du chemin de contrôle pour génération de net-lists. Refonte du générateur d'exécutif pour support des architectures hétérogènes. Diffusion sur Internet de SynDEx v5.1 avec noyau d'exécutif pour réseau hétérogène de stations de travail Unix. Étude de la prise en compte des System-On-Chip multiprocesseurs hétérogènes avec partie SIMD. Étude de la prise en compte de la tolérance aux pannes.*

Modèles d'algorithme, d'architecture et d'implantation. Lors de la spécification du graphe modélisant l'algorithme, le choix de la granularité (des opérations et des données qu'elles traitent) de l'algorithme influant sensiblement sur les résultats de l'adéquation, nous avons introduit une description hiérarchique des opérations de l'algorithme, où une opération peut être décomposée en un graphe d'opérations de granularité plus fine. On peut envisager ainsi une amélioration des heuristiques d'adéquation permettant de choisir automatiquement le niveau de granularité offrant un bon compromis entre la durée d'exécution de l'heuristique et la précision de l'allocation (des ressources de l'architecture), qui augmentent toutes les deux avec le nombre de grains. La hiérarchie permet également d'encapsuler un motif répétitif dans une seule opération, dont la décomposition correspond au motif, et dont le nombre de répétitions (fini ou infini) est un attribut de l'opération. Enfin, la hiérarchie est aussi une fonctionnalité attendue classiquement par les utilisateurs pour la spécification de l'algorithme.

Pour simplifier la spécification du conditionnement et pour améliorer sa prise en compte dans l'heuristique d'optimisation, nous avons étudié l'intérêt d'étendre le domaine de valeur des dépendances de conditionnement, d'un domaine booléen bi-valué à un domaine entier n-valué. Cela permettra de remplacer des arbres binaires de conditionnement à n niveaux par un arbre n-aire à un seul niveau. Cette fonctionnalité sera bien adaptée à la spécification et à l'optimisation des machines à états finies utilisées pour décrire en flot de données l'enchaînement de lois de commande (“modes de fonctionnement”).

Dans le graphe modélisant l'architecture, les hyperarcs ne permettent pas de décrire avec une précision suffisante le comportement d'un média de communication comprenant plusieurs bancs mémoire, et/ou plusieurs bus, chacun avec son multiplexeur et son arbitre, interconnectés de manière arborescente. Aussi nous avons remplacé chaque hyperarc par un ensemble de sommets et d'arcs, dont chaque sommet est un bus/multiplexeur/arbitre, avec ou sans mémoire RAM ou FIFO (un hyperarc doit comporter au moins un sommet avec mémoire), et dont chaque arc représente une connexion entre le bus et un autre bus, ou entre le bus et un opérateur (de calcul ou de communication). Nous avons aussi remplacé la matrice d'interférences caractérisant les performances d'un hyperarc, insuffisamment précise, par une table pour chaque sommet bus, donnant pour chaque connexion son débit maximum et son niveau de priorité d'arbitrage.

Optimisation. Nous continuons à étudier la prise en compte, dans l’heuristique d’optimisation de l’implantation, de contraintes temps réel multiples (latences et cadences) et la possibilité de générer des parties dynamiques dans l’exécutif. En fonction des contraintes et des durées d’exécution, certaines parties d’applications qui ne respecteraient pas les contraintes en utilisant un exécutif totalement statique, peuvent les respecter en utilisant un exécutif dynamique, par exemple de type “rate-monotonic”. Cependant le surcoût des changements de contextes préemptifs (dynamiques, en fonction des priorités rate-monotonic) peut être minimisé par des changements de contexte coopératifs (statiques, préordonnés). D’autre part, l’utilisation d’entiers de conditionnement (extension des booléens de conditionnement), parce qu’elle rend explicite l’exécution exclusive d’un seul parmi les n sous-graphes d’opérations conditionnés chacun par une valeur différente du même entier de conditionnement, permet de ne prendre en compte, pour l’optimisation du chemin critique, que le sous-graphe d’opérations le plus critique.

Génération d’exécutif. La génération d’exécutif a été entièrement revue pour permettre la prise en compte de l’hétérogénéité de l’architecture tout en réduisant la taille du jeu de macros du noyau générique d’exécutif. Pour cela, certaines macros génériques sont paramétrées par le *type de l’opérateur* (de calcul ou de communication) pour lequel elles doivent générer des instructions, et ce type est utilisé pour générer des appels de macros spécifiques au type de l’opérateur. Ceci permet une séparation des définitions des macros génériques et des macros spécifiques, souhaitable pour un bon développement logiciel. De plus, l’exécution exclusive, des sous-graphes d’opérations conditionnés chacun par une valeur différente d’un même booléen (et bientôt entier) de conditionnement, se traduit dans la génération d’exécutifs par des *macro-instructions de contrôle structuré* contrôlant le séquençement des autres macro-instructions (de calcul ou de communication, et de synchronisation).

Génération de net-list. La factorisation des dépendances de données et des opérations du graphe de l’algorithme se concrétise par un “chemin de contrôle” ajouté au “chemin de données”. Le chemin de contrôle est composé d’*unités de contrôle* interconnectées, qui assurent chacune la synchronisation des transferts entre les registres à la frontière du motif factorisé. Chaque unité de contrôle comprend une logique combinatoire très simple et un compteur modulo pour piloter les multiplexeurs à la frontière du motif factorisé, et génère un signal de synchronisation à chaque période du compteur. Le chemin de contrôle correspondant au conditionnement (booléen et bientôt entier) se traduira plus simplement par des multiplexeurs. Nous collaborons avec le LPSI de l’ESIEE pour développer un générateur de net-list dans le cas des circuits reconfigurables (FPGA XILINX). 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.

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, est maintenant téléchargeable, sans mise à disposition préalable, sur le Web à l’URL : <http://www-rocq.inria.fr/syndex>

La réalisation de l'interface avec le logiciel Scicos de simulation de systèmes hybrides, développé à l'INRIA dans le projet Meta2, a continué cette année. Une seconde version, compatible avec SynDEx v5, est disponible en beta-test.

Une interface permettant de spécifier les enchaînements de lois de commandes (modes de fonctionnement) d'un système temps réel, sous la forme d'un automate de Moore, a été prototypée dans le cadre de la version 5.0 de SynDEx. Cette interface intègre un transformateur dont le but est de générer automatiquement un graphe flot de données conditionné équivalent à l'automate ainsi spécifié. Les entrées du graphe généré correspondent aux conditions des transitions de l'automate et les sorties à des signaux booléens (arcs de conditionnement) qui permettent de conditionner les calculs à réaliser dans chacun des modes de fonctionnement. La transformation mise en œuvre ici produit une structure de graphe autorisant une implantation tirant au mieux partie de la nature distribuée des architectures.

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's envisagés dans les applications avancées de télécommunication, qui comportent sur le même circuit un processeur SIMD homogène (un seul séquenceur d'instructions pour plusieurs unités de calcul), et d'autres processeurs RISC et DSP, le tout constituant un calculateur MIMD hétérogène. La méthodologie PLC2 et l'outil APOTRES qui la supporte, développés par le LCR en collaboration avec le CRI, sont bien adaptés à la programmation optimisée des processeurs SIMD. Nous avons étudié les complémentarités entre AAA et PLC2 dans le but de faire coopérer SynDEx et APOTRES pour réaliser un démonstrateur d'environnement de programmation optimisé pour les SOC's.

Tolérance aux pannes. Dans le cadre de l'ARC TOLERE, nous avons étudié comment introduire la tolérance aux pannes dans la méthodologie AAA et SynDEx. Nous nous sommes placés dans un premier temps dans le cas de la "tolérance transparente", c'est-à-dire sans que l'utilisateur n'ait à spécifier différents comportements en fonction des pannes ("modes dégradés"), et dans le cas où seul un nombre déterminé d'opérateurs de calcul et d'opérateurs de communication peuvent tomber en panne définitive. Dans ce cadre, la méthode consiste à dupliquer automatiquement chaque opération de calcul du graphe de l'algorithme et à les affecter à des opérateurs de calcul différents, et à dupliquer automatiquement les communications interprocesseur et à les affecter à des opérateurs de communications différents. Une heuristique a été étudiée pour optimiser dans ces conditions la distribution et l'ordonnancement du graphe de l'algorithme ainsi transformé sur le graphe de l'architecture.

7 Contrats industriels (nationaux, européens et internationaux)

7.1 Stop&Go

Participants : David Maurel, Michel Sorine.

Contrat Renault 1 96 D417 00 21102 01 2 (contrat d'accompagnement du CIFRE de D.

Maurel). La fonction Stop&Go apporte une assistance dans certaines phases de conduite (embouteillages, ...). C'est le sujet de thèse de D. Maurel, dans le cadre d'une convention Cifre. Une étude de modélisation et contrôle du comportement longitudinal en tout point du plan vitesse - roues / couple - roues a été réalisée.

Les difficultés viennent de cycles limites sur les passages de rapport ("pompage") qui peuvent apparaître dans certaines conditions, et du comportement du contact pneu/sol aux basses vitesses. Un prototype à base de Safrane est maintenant opérationnel.

7.2 Modélisation mathématique d'organes de véhicules automobiles à basse consommation. Applications en simulation, estimation et commande

Participants : Ahmed Ketfi-Cherif, Michel Sorine, Jean-Pierre Yvon.

Contrat Renault 1 96 D609 00 21102 01 2. Nous avons étudié les années passées des modèles généraux de pots catalytiques [ALS96]. Ils constituent une classe particulière d'équations de réaction-diffusion que nous avons utilisées pour représenter plusieurs composants clés de véhicules automobiles à basse consommation : nouveaux pots catalytiques pour mélanges pauvres et en particulier les "pièges à NO_x "; nouveaux capteurs de gaz ; nouvelles batteries Lithium-ion pour véhicules hybrides. Le modèle générique pour tous ces composants est le système (11) :

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial C}{\partial t} = D(t) \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} - \alpha_0 V(t) \frac{\partial C}{\partial x} + K_C \mathcal{A}(C, \Theta) \quad 0 < x < l, \quad t > 0 \\ \frac{\partial \Theta}{\partial t} = K_\Theta \mathcal{A}(C, \Theta) \\ - \left[(1 - \alpha_0) \lambda + \frac{\alpha_0}{V} D \right] \frac{\partial C}{\partial x}(0, t) = -(\alpha_0 + \alpha_1) C(0, t) + C^{\text{in}} \\ \frac{\partial C}{\partial x}(l, t) = (1 - \alpha_0 - \alpha_1) BC(l, t) - \frac{\alpha_0}{V} \left(\frac{\partial C}{\partial t}(l, t) - K_C \mathcal{A}(C(l, t), \Theta(l, t)) \right) - \alpha_1 \mu I^{\text{in}} e_1 \end{array} \right. \quad (11)$$

	électrode à gaz (Pt) $\alpha_0 = 0, \alpha_1 = 1$	piège à NOx $\alpha_0 = 1, \alpha_1 = 0$	batterie Li-ion $\alpha_0 = \alpha_1 = 0$
C	$(C_{Ox} \ C_{Red})^T$	$(C_{O_2} \ C_{NO_x} \ C_{CO} \ C_{HC})^T$	$(c^a \ \Phi^a \ c^c \ \Phi^c)^T$
Θ	Θ	$(\Theta_N \ \Theta_O)^T$	$(c_s^a \ c_r^a \ c_s^c \ c_r^c)^T$
C^{in}	C^{in}	C^{in}	$(0 \ -I(t)\delta_a/\sigma^a \ 0 \ I(t)\delta_a/\sigma^c)^T$
I^{in}	I	0	0
$\mathcal{A}(C, \Theta)$	$r = 3$	$r = 11$	$r = 4$

Dans ce système, C est le vecteur des concentrations des espèces mobiles, Θ le vecteur des fractions massiques des espèces fixes et $\mathcal{A}(C, \Theta)$ le vecteur des fréquences de réaction.

[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.

Cette forme homogène de modèle a permis l'étude de plusieurs applications cette année, dont, en particulier, des problèmes de commande de piège à NOx (détermination de stratégies court-terme de purge des NO_x). ([49], [30]).

7.3 Modélisation de la pollution et de la consommation de moteurs essence

Participants : Pascal Emery, Michel Sorine.

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/ NO_x pour la gestion des pots catalytiques de réduction des NO_x ...).

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) ...

7.4 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.

Méaude). Ce travail est fait en collaboration avec F. Bonnans (action MOCO).

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).

7.5 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.

7.6 Modèles réduits du contact pneu/sol et applications

Participants : Michel Sorine, Joël Szymanski.

Contrat Renault 1 95 D333 00 21102 01 2 (contrat d'accompagnement du CIFRE de J. Szymanski). Il s'agit d'un travail de modélisation mathématique du contact pneu/sol pour les applications à l'automatique continue (sujet de thèse de J. Szymanski, Direction de la Recherche de Renault, dans le cadre d'une convention Cifre). C'est une application des travaux sur l'hystérésis et le frottement. Un véhicule instrumenté a permis de réaliser plusieurs expérimentations pour valider les modèles. Plusieurs applications ont été envisagées : simulateurs de comportement routier, dimensionnement de directions assistées, directions assistées électriques, d'autres le seront comme la surveillance de l'adhérence ...

Ces travaux ont motivé des extensions théoriques des modèles d'hystérésis et de frottement : hystérésis dans le plan, frottement de Coulomb dans le cas d'un contact non ponctuel (extension de la théorie de Contensou) qui seront publiés ultérieurement.

7.7 SynDEx et les collaborations industrielles

Participants : Thierry Grandpierre, Rémy Kocik, Christophe Lavarenne, Yves Sorel.

Action de développement LaRA. Voir la page web <http://www-lara.inria.fr/> pour une présentation 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 microcontrôleur MC68332, sur le nouveau CyCab industrialisé par la Sté Robosoft, qui utilise de nouveaux microcontrôleur MPC555 à base de PowerPC.

Thomson-CSF-Télécommunications, Thomson-CSF-LCR, Simulog 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 médias de communication intra-SOC et inter-SOC.

Synopsis-Castor 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 régionales

Programme de recherche pluriformation en Automatique, Biologie et Santé

Intitulé : "Genèse, modélisation et contrôle des rythmes cardio-vasculaires : application à la pathologie humaine", Université Paris-Sud, Pr. Pierre Escourrou et Pr. Daniel Claude ; programme soumis au MENESRT.

8.2 Actions nationales

8.2.1 Actions de recherche coopératives Inria

- Action de Recherche Coopérative CARDIO

Voir la page web <http://www-rocq.inria.fr/sosso/cardio/>

Projets SIGMA2, SOSSO et Université Paris VIII, St Denis (1997-1999).

Intitulé : Analyse à court et moyen terme de la variabilité du rythme cardiaque.

Participants pour SOSSO : Julie Bestel, Jean Clairambault, Claire Médigue, Alessandro Monti, Michel Sorine.

- Action de Recherche Coopérative TOLERE. Voir la page web

<http://www.inrialpes.fr/bip/people/girault/Projets/Incitative/index-fr.html>
Projets BIP, SOSSO (1998-1999).

Intitulé : Code réparti tolérant aux pannes pour systèmes embarqués.

Participants pour SOSSO : Mihaela Sighireanu, Yves Sorel et Christophe Lavarenne.

8.2.2 Programme de recherche interdisciplinaire “Modélisation et commande des régulations biologiques”

Ce programme de recherche que coordonne Daniel Claude 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 ([11]). 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.

8.2.3 Projet National RNRT PROMPT

Yves Sorel, Christophe Lavarenne et Thierry Grandpierre, participent au projet PROMPT (Placement Rapide Optimisé sur Machines Parallèles pour les applications Télécoms) avec Thomson-CSF-Télécommunications, Thomson-CSF-LCR, Simulog et Armines.

8.2.4 Projet national AEE

Yves Sorel est coordinateur du comité technique du projet national AEE visant à développer une méthodologie de conception d'Architecture Électronique Embarquée pour le domaine des transports. Ce projet réunit les deux constructeurs automobile français et l'Aérospatiale, ainsi que les équipementiers, Sagem, Siemens-AT et Valeo, et ainsi que les laboratoires IRCyN et LORIA.

Yves Sorel et Remy Kocik 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.

8.2.5 Action de développement Inria AEE

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

8.3 Actions financées par la Commission Européenne

Projet Esprit MODISTARC

Yves Sorel et Rémy Kocik ont participé au projet MODISTARC qui réunit les principaux constructeurs et équipementiers automobiles européens, sur la certification du “Système d’exploitation ouvert pour l’électronique automobile” OSEK.

8.4 Relations bilatérales internationales

8.4.1 Projets de l’institut Lyapounov

- Nous avons en 99 trois projets dans le cadre de cet institut franco-russe :
- “Analyse et commande de systèmes à retard” (97–99). Responsables : P.-A. Bliman, V. B. Kolmanovski.
 - “Compilateur C ouvert pour processeurs de traitement du signal” (98–99). Responsables : Yves Sorel, Sergei Baranoff.
 - “Gyroscopes vibrants” (1999–2000). En coopération avec l’avant-projet MACS. Responsables : D. Chapelle, Y.K. Zbhanov.

8.4.2 Amérique

Programme Franco-Chilien Ecos. Inria / Université du Chili: “Etude de la réactivité cardiaque aux stimuli en fonction des stades de sommeil” 05 1997-05 1999.

8.5 Accueils de chercheurs étrangers

- Michel Delfour, Centre de recherches mathématiques, Montréal. Invité 6 mois (dont 3 en 99) par les projets MACS et Sosso.
 - Leonid Fridman, Dept of Mathematics, Samara State Architecture and Building Academy, Samara, Russie, 2 semaines.
 - José Herskovits Norman, Université Fédérale de Rio de Janeiro, 2 semaines.
 - Alexandre M. Krasnosel’skii, Université de Moscou, 1 mois.
 - Jonathan Partington, Université de Leeds (programme Alliance), 1 semaine.
- Chercheurs invités dans le cadre du projet Liapunov “Analyse et commande des systèmes à retard” :
- A.A. Kovalev, Moscow State Institute of Electronics and Mathematics, Russie, 1 semaine.
 - V.R. Nosov, Moscow State Institute of Electronic and Mathematics: 2 semaines.

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).

GDR TDSI

Yves Sorel est responsable du groupe de travail GT7: Adéquation Algorithme Architecture du PRC-GDR ISIS (Information Signal Images et viSion).

Divers

- Catherine Bonnet 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 fait aussi partie du Comité d'organisation du Forum des Jeunes Mathématiciennes, janvier 2000, IHP, Paris. Elle organise le séminaire Meta2 / 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, depuis le 1er juin 1999, Directeur de la Division des Formations de l'UFR des Sciences d'Orsay. Il est membre de la commission de spécialistes, 61-ème section, à l'UFR des Sciences d'Orsay.
- Yves Sorel a fait partie du comité de programme du 17ème Colloque GRETSI sur le traitement du signal et des images qui a eu lieu à Vannes du 13 au 17 septembre 1999.
- Michel Sorine est éditeur associé du journal ESAIM: COCV. Il fait partie du comité de programme de MTNS 2000, 14ème édition de l'“International Symposium on the Mathematical Theory of Networks and Systems”, 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.
- P.-A. Bliman : chargé de TD du cours de “Systèmes linéaires” de l'ENSTA.
- 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 : cours “Spécification, vérification et optimisation des systèmes distribués temps réel

embarqués”, Ecole d’ingénieurs ESIEE, Noisy-le-Grand.

- Y. Sorel : cours “Adéquation Algorithme Architecture”, DEA Orsay “Systèmes électroniques de traitement de l’information”.

- M. Sorine : conférence dans le cadre du DEA d’automatique d’Orsay sur “Automatique et Automobile”.

Formation permanente

- C. Lavarenne et Y. Sorel : nombreuses sessions de formation au logiciel SynDEx.

- C. Médigue, A. Monti : formation à l’utilisation du logiciel LARY_CR.

9.3 Participation à des colloques, séminaires, invitations

Participation à des manifestations

Daniel Claude a organisé à l’Institut Henri Poincaré, le 27 mai 1999, dans le cadre des “Journées thématiques du GdR Automatique”, une journée sur le “Programme de recherche *Automatique, Biologie et Santé : Modélisation et commande de régulations biologiques* ([11]).

J. Bestel, J. Clairambault, F. Clément, C. Médigue, A. Monti, M. Sorine ont participé à cette journée.

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, « Robust stabilization in the BIBO gap topology », *International Journal of Robust and Nonlinear Control* 7, 1997, p. 429–447.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] 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.

- [8] C. LAVARENNE, Y. SOREL, «Performance Optimization of Multiprocessor Real-Time Applications by Graph Transformations», *in: Proc. of Parallel Computing 93 Conference*, Grenoble, September 1993.
- [9] 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.
- [10] 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

- [11] D. CLAUDE (éditeur), *Actes du Programme de recherche “Automatique, Biologie et Santé: modélisation et commande de régulations biologiques”*, Journée thématique du GdR “Automatique”, Paris, 27 mai 1999.

Thèses et habilitations à diriger des recherches

- [12] A. KETFI-CHERIF, *Modélisation mathématique d'organes de véhicules automobiles à basse consommation. Applications en simulation, estimation et commande*, thèse de doctorat, Université Paris IX Dauphine, Décembre 1999.
- [13] A. VICARD, *Formalisation et optimisation des systèmes distribués temps réel embarqués*, thèse de doctorat, Université Paris XIII, Juillet 1999, spécialité informatique.

Articles et chapitres de livre

- [14] M. AKIAN, P.-A. BLIMAN, «On super-high-frequencies in discontinuous 1st-order delay-differential equations», *J. of Differential Equations*, 1999, à paraître.
- [15] P.-A. BLIMAN, «Extension of Popov absolute stability criterion to nonautonomous systems with delays», *Int. J. Control*, 1999, à paraître.
- [16] P.-A. BLIMAN, «Extension of Popov criterion to time-varying nonlinearities: LMI, frequential and graphical conditions», *in: Stability and stabilization of nonlinear systems*, A. v. d. S. D. Æeyels, F. Lamnabhi-Lagarrigue (éditeur), *Lecture notes in control and information sciences 246*, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 1999, p. 95–114.
- [17] C. BONNET, J. R. PARTINGTON, M. SORINE, «Digital phase-locked loops tracked by a relay sensor», *IEEE Trans. on Communications 47*, 5, May 1999.
- [18] 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.
- [19] C. BONNET, J. R. PARTINGTON, M. SORINE, «Robust stabilization of a delay system with saturating actuator or sensor», *Int. J. Robust Nonlin. Control*, 1999, à paraître.
- [20] 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.

- [21] D. CLAUDE, J. CLAIRAMBAULT, «Déplacement de rythme par stimulation intermittente du modèle des oscillations de la protéine PER chez la Drosophile», *Traitement du signal* 15, 6, 1999, p. 637–642, Actes du colloque en l'honneur du professeur Picinbono, Paris, 19-20 Mai 1999, numéro spécial.
- [22] D. CLAUDE, J. CLAIRAMBAULT, «Period shift induction by intermittent stimulation in a Drosophila model of PER protein oscillations», *Chronobiology International*, 1999, à paraître.
- [23] M. LANDAU, A. BARDOU, «Driving patterns of a large non-pacemaker cell by a small pacemaker one. Associated chaotic and coexisting stable states phenomena», *Computers in Cardiology*, 1999, à paraître.
- [24] P. MAIRE, S. CORVAISIER, M. BOUVIER D'YVOIRE, D. CLAUDE, X. BARBAUT, G. CARRET, F. JEHL, J.-C. THALABARD, R. W. JELLIFE, «Pharmacocinétique / pharmacodynamie clinique des antibiotiques», in: *Précis de Bactériologie Clinique*, J. Freney, F. N. Renaud, W. Hansen, et C. Bollet (éditeurs), 3-ème édition, Éditions Eska, Paris et Alexandre Lacassagne, Lyon, 1999.
- [25] P. M. NDIAYE, M. SORINE, «Delay sensitivity of quadratic controllers. A singular perturbation approach.», *SIAM J. Control Optim.*, 1999, à paraître.

Communications à des congrès, colloques, etc.

- [26] 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), *Journée thématique du GdR "Automatique"*, Paris, 27 mai 1999. 28 pages.
- [27] P.-A. BLIMAN, A. KRASNOSEL'SKII, «Popov absolute stability criterion for time-varying multi-variable nonlinear systems», in: *Proc. 5th European Control Conference, Karlsruhe (Germany)*, September 1999.
- [28] P.-A. BLIMAN, «Absolute stability of nonautonomous delay systems: delay-dependent and delay-independent criteria», in: *Proc. of 38th IEEE CDC, Phoenix (Arizona)*, December 1999. invited lecture.
- [29] P.-A. BLIMAN, «Delay-independent criterion of absolute stability for nonautonomous systems with variable delays», in: *Proc. of IMACS/IEEE CSCC'99, Athens (Greece)*, 1999.
- [30] F. BONNANS, A. KETFI-CHERIF, «Optimal control a gasoline-fueled car engine under pollution constraint», in: *Conférence CANUM 99, ESAIM proceedings*, Ax-Bonascres, Mai 1999.
- [31] D. CLAUDE, J. CLAIRAMBAULT, A. DESMÉZIÈRES, «Travaux pratiques sur les systèmes non linéaires: étude d'un modèle de la régulation de la synthèse de la protéine PER chez la Drosophile», in: *Colloque sur l'Enseignement des Technologies et des Sciences de l'Information et des Systèmes (CETIS-EEA'99)*, Montpellier, 4 et 5 novembre 1999.
- [32] 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), *Journée thématique du GdR "Automatique"*, Paris, 27 mai 1999. 22 pages.

- [33] D. CLAUDE, J. CLAIRAMBAULT, F. LÉVI, «Rythmes biologiques et chronothérapeutique: comparaison entre des schémas d'administration théoriques et des thérapeutiques appliquées en cancérologie», *in: Congrès de la Société Francophone de Chronobiologie, Bordeaux*, 10-12 mai 1999.
- [34] D. CLAUDE, J. CLAIRAMBAULT, «Shift of the period by intermittent stimulation in a model for PER protein oscillations in Drosophila», *in: Theory and Mathematics in Biology and Medicine, 4th ESMTB meeting- SMB annual meeting, Amsterdam*, p. 128–131, June 29-July 3 1999.
- [35] D. CLAUDE, «Déplacement de cycles limites et régulations biologiques : aspects chronothérapeutiques (Conférence invitée)», *in: Congrès annuel de l'Association de Chronobiologie Médicale, Aussois, France*, 12-15 septembre 1999.
- [36] 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), *Journée thématique du GdR "Automatique"*, Paris, 27 mai 1999. 16 pages.
- [37] 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), *Journée thématique du GdR "Automatique"*, Paris, 27 mai 1999. 30 pages.
- [38] R. DEJENIDI, C. LAVARENNE, R. NIKOUKHAH, Y. SOREL, S. STEER, «From Hybrid System Simulation to Real-Time Implementation», *in: 11th European Simulation Symposium and Exhibition*, Erlangen-Nuremberg, octobre 1999.
- [39] T. GRANDPIERRE, C. LAVARENNE, Y. SOREL, «Optimized Rapid Prototyping For Real Time Embedded Heterogeneous Multiprocessors», *in: CODES'99 7th International Workshop on Hardware/Software Co-Design*, Rome, mai 1999.
- [40] M. LANDAU, A. BARDOU, «Transition rules between various coexisting equilibrium states in a cardiac non-pacemaker cell», *in: Theory and Mathematics in Biology and Medicine*, Amsterdam, Juin 1999.
- [41] L. MANGIN, A. MONTI, C. MÉDIGUE, I. MACQUIN-MAVIER, M. LOPEZ, P. GUERET, A. CASTAIGNE, J. BESTEL, C. BAILLARD, B. SWYNGHEDAUW, P. MANSIER, «Baroreflex in chronic heart failure. Abnormal gain during paced-breathing», *in: J. of Cardiac Failure*, Heart failure society of America, San Francisco, USA, Sept. 1999. vol 5, n. 3, suppl 1.

Rapports de recherche et publications internes

- [42] P.-A. BLIMAN, A. KRASNOSEL'SKII, «An extension of Popov criterion to multivariable time-varying nonlinear systems. Application to criterion for existence of stable limit cycles», *Rapport de Recherche n° 3512*, INRIA, 1999.
- [43] P.-A. BLIMAN, «Extension of Popov absolute stability criterion to nonautonomous systems with delays», *Rapport de Recherche n° 3625*, INRIA, 1999.

Divers

- [44] C. BAILLARD, P. MANSIER, P. ENNEZAT, C. MÉDIGUE, A. OUBÉNAÏSSA, B. SWYNGHEDAUW, B. CHEVALIER, « Reversible enhancement in QT interval in spontaneously hypertensive rats », 1999, article soumis.
- [45] J. BESTEL, M. SORINE, « Modélisation mathématique de la contraction musculaire. Application au système cardio-vasculaire », 1999, Preprint.
- [46] C. BONNET, J. R. PARTINGTON, « Coprime factorizations and stability of fractional differential systems », article soumis, 1999.
- [47] C. BONNET, J. R. PARTINGTON, « Stabilization and nuclearity of fractional differential systems », MTNS2000, Perpignan, 19-23 june, soumis, 1999.
- [48] P. ESCOURROU, C. MÉDIGUE, A. MONTI, H. NEDELCOUX, « Heart rate and blood pressure control during sleep in normal subjects: importance of respiration and normalisation for analysis », 1999, article soumis.
- [49] A. KETFI-CHERIF, D. VON WISSEL, S. BEURTHEY, M. SORINE, « Modeling and Control of a NOx Trap Catalyst », in : *SAE2000, Detroit, Michigan*, March 6-9 2000. Preprint 1999, à paraître.
- [50] L. MANGIN, C. MÉDIGUE, A. KOBESSI, A. MONTI, D. LELOUCHE, Y. D'HEROUVILLE, P. MANSIER, I. MACQUIN-MAVIER, « Heart rate variability and myocardial contractility during head up tilt in patients with vasovagal syncope », 1999, preprint.
- [51] C. MÉDIGUE, A. GIRARD, D. LAUDE, A. MONTI, M. WARGON, J. ELGHOZI, « Relation between vagal tone and respiratory sinus arrhythmia: a time- and frequency-domain analysis of the effects of atropine », 1999, article soumis.
- [52] M. SORINE, J. SZYMANSKI, « A new all-vehicle-speed dynamic tire model », in : *IFAC Symposium on Control in Transportation Systems 2000, Braunschweig, Germany*, June 13-15, 2000. Preprint 1999, à paraître.