

*Projet BIP**Contrôle/commande de robots marcheurs  
et applications**Rhône-Alpes*

THÈME 4A



*R*apport  
*d'**A*ctivité

2002



# Table des matières

<b>1. Composition de l'équipe</b>	<b>1</b>
<b>2. Présentation et objectifs généraux</b>	<b>1</b>
<b>3. Fondements scientifiques</b>	<b>2</b>
3.1. Les robots bipèdes	2
3.1.1. Motivations	2
3.1.2. Problématique scientifique	2
3.1.2.1. Conception générale	2
3.1.2.2. Modélisation	3
3.1.2.3. Commande	3
3.2. Analyse, modélisation et commande de systèmes dynamiques non-réguliers	4
3.2.1. Généralités	4
3.2.2. Applications	4
3.2.3. Problèmes ouverts	5
3.3. Contrôle/commande temps-réel de systèmes robotiques complexes	5
3.3.1. Programmation des contrôleurs hybrides	5
3.3.2. L'environnement de conception Orccad	5
3.3.3. Développements futurs et problèmes ouverts	6
<b>4. Domaines d'application</b>	<b>6</b>
<b>5. Logiciels</b>	<b>7</b>
5.1.1. Fonctionnalités d'Orccad.	7
5.1.2. Version diffusée.	7
5.1.3. Nouveaux développements.	7
<b>6. Résultats nouveaux</b>	<b>8</b>
6.1. Modélisation et commande	8
6.1.1. Génération de trajectoires de marche 3D	8
6.1.2. Commande prédictive pour la locomotion artificielle	8
6.1.3. Activités sur le prototype BIP	9
6.1.4. Systèmes mécaniques non-réguliers	9
6.2. Aide à la conception de systèmes temps-réel de contrôle/commande	10
6.2.1. Tolérance aux pannes	10
6.2.2. Recherche de chemins disjoints dans un réseau de processeurs	10
6.2.3. Répartition automatique de programmes synchrones	11
6.2.4. Répartition de programmes Lustre dirigée par les horloges	12
6.2.5. Génération automatisée de contrôleurs	12
6.2.6. Ordonnancement régulé	13
<b>7. Contrats industriels</b>	<b>15</b>
7.1. Schneider Electric	15
7.2. ST Microelectronics	15
7.3. RNTL Automate	15
7.4. France Telecom R&D	15
<b>8. Actions régionales, nationales et internationales</b>	<b>16</b>
8.1. Actions régionales	16
8.1.1. Jessica	16
8.2. Actions nationales	16
8.2.1. GdR Automatique : « Commande de robots à pattes »	16
8.2.2. GdR Automatique « Systèmes à retards »	16
8.2.3. Groupe COSED	16

8.2.4.	Projet Robea « electrostimulation des paraplégiques »	16
8.2.5.	Pre-projet Robea « commande des hélicoptères »	16
8.2.6.	Collaborations internes à l'Inria	16
8.2.7.	Collaborations avec d'autres laboratoires	17
8.3.	Actions européennes	17
<b>9.</b>	<b>Diffusion des résultats</b>	<b>18</b>
9.1.	Animation de la communauté scientifique	18
9.2.	Enseignement	19
<b>10.</b>	<b>Bibliographie</b>	<b>19</b>

# 1. Composition de l'équipe

## Responsable scientifique

Eric Rutten [CR Inria]

## Assistante de projet

Françoise de Coninck [à temps partiel dans le projet]

## Personnel Inria

Bernard Brogliato [DR]

Bernard Espiau [DR, à temps partiel]

Alain Girault [CR]

Gregor Gößler [CR, à partir du 15 décembre 2002]

Olivier Sename [En délégation de l'INPG-ENSIEG, depuis le 1<sup>er</sup> septembre 2002]

Daniel Simon [CR]

## Ingénieurs

Serpil Karakas [Ingénieur expert (projet AUTOMATE), depuis le 1<sup>er</sup> septembre 2002]

Olivier Testa [Ingénieur associé]

## Chercheurs doctorants

Christine Azevedo [Boursière MENRT, jusqu'au 1<sup>er</sup> octobre 2002]

Jean-Matthieu Bourgeot [Boursier MENRT]

Sophie Chareyron [Boursière INRIA-SICONOS, depuis le 1<sup>er</sup> octobre 2002]

Hamoudi Kalla [Boursier Inria-EEA]

Antonio Medina-Rodriguez [Boursier Conacyt (Mexique), jusqu'au 1<sup>er</sup> septembre 2002]

## Chercheurs post-doctorants

Vincent Acary [Post-doc. CNRS-Schneider Electric]

Karine Altisen [Post-doc. INRIA-RHÔNE-ALPES, jusqu'au 1<sup>er</sup> septembre 2002]

Philippe Manon [Post-doc. ARTIST, du 4 au 15 novembre 2002]

## Stagiaires

Mourad Abed [mars-mai 2002, DEA Automatique]

Anuj Bindal [mai-juillet 2002, BsC I.I.T. Delhi, Inde]

Guillaume Chevret [juin-décembre 2002, ENSIEG]

Aurélie Clodic [février-août 2002, DEA IVR]

Fabien Giraud [avril-août 2002, ISIMA]

Léonard Jaillet [février-août 2002, DEA IVR]

Sébastien Jardé [mars-août 2002, ENSPS]

Roberto Lopez-Toro [mars-juin 2002, DEA Automatique]

Thibault Neveu [avril-sept. 2002, DEA Micro-électronique]

Fabrice Salpetrier [mars-juin 2002, ESISAR]

Teck-Hou Teng [janvier-juin 2002, NTU Singapour]

## Collaboratrices extérieures

Nathalie Cislo [UJF SPM/UFRAPS, jusqu'au 1<sup>er</sup> septembre 2002]

Karine Altisen [VERIMAG, INPG-ENSIMAG, depuis le 1<sup>er</sup> septembre 2002]

# 2. Présentation et objectifs généraux

Le projet a pour objectif l'étude générique des divers aspects intervenant dans le contrôle/commande des systèmes robotiques complexes. Les activités du projet se déclinent selon deux grands thèmes scientifiques : la modélisation et la commande de systèmes marcheurs d'une part ; l'étude de méthodes et d'outils pour le contrôle/commande temps-réel d'autre part.

L'intérêt des systèmes marcheurs réside dans leur capacité d'adaptation à des terrains ou des sols variés, leur permettant de se déplacer dans des milieux très contraints en dimensions, voire mal structurés. Les robots anthropomorphes sont donc particulièrement aptes à évoluer dans nos environnements courants, privés ou industriels, essentiellement conçus pour la bipédie. Ainsi, les domaines d'application visés sont-ils en priorité les robotiques personnelle, de service et d'intervention. Parallèlement, le projet s'attache à développer des activités de modélisation dans certains domaines de la biomécanique. Enfin, le projet ne souhaite pas que les applications de ses recherches se limitent au domaine des seuls robots marcheurs, dont le marché industriel est actuellement marginal. C'est pourquoi les techniques étudiées sont voulues suffisamment génériques pour faire l'objet de mises en œuvre dans d'autres domaines.

Le contrôle/commande temps-réel de systèmes robotiques complexes relève de la problématique plus générale de la modélisation et programmation de systèmes mêlant aspects de commande (continue échantillonnée) et de contrôle (discret). On les trouve en robotique, mais aussi en avionique, dans l'automobile et dans les automatismes de production. Ils sont réactifs, ont des modes multiples, des cadences multiples, et doivent être tolérants aux pannes. Nous abordons ces problèmes sous l'angle des méthodes formelles, notamment l'approche synchrone. Dans un souci d'utilisabilité par des spécialistes du domaine cible, et non de celui des techniques formelles, nous proposons des langages spécialisés pour la spécification de missions, de tâches, et de propriétés. Ce dernier point est lié à l'utilisation de méthodes de vérification formelle. La tolérance aux pannes est abordée comme un problème d'ordonnancement réparti avec réplication. Enfin, la génération automatisée de contrôleurs est fondée sur l'utilisation de la synthèse de contrôleurs discrets. L'environnement ORCCAD intègre certaines des solutions proposées.

Parmi ses relations internationales, le projet BIP est actif dans le projet Européen IST SICONOS, dans le réseau européen d'excellence ARTIST et le réseau CLAWAR.

## 3. Fondements scientifiques

### 3.1. Les robots bipèdes

**Mots clés :** *commande, commande référencée capteur, mécanique, mécanique des solides, modélisation, robotique, robotique mobile, simulation de système mécanique, temps-réel, asservissement visuel.*

#### 3.1.1. Motivations

Dans la classe des systèmes mobiles, les robots marcheurs, par exemple hexapodes, présentent des avantages certains sur leurs homologues à roues dès que le sol n'est plus plan ou libre : le franchissement des obstacles est plus aisé, l'emprise au sol plus faible, l'adaptabilité meilleure. Ceci concerne les grands domaines de la robotique non-manufacturière : exploration, maintenance, intervention, service. Cependant, dès lors que l'environnement de travail du système est conçu pour l'homme, la technologie multipode doit en général laisser place à la bipédie si l'on désire conserver de bonnes possibilités de déplacement et d'action sans modifier l'environnement. D'où l'intérêt assez récent que porte la communauté mondiale de Recherche et Développement en robotique aux systèmes dits humanoïdes, destinés à accompagner l'homme dans certaines de ses activités personnelles ou professionnelles. Par exemple, une certaine forme d'assistance à domicile de personnes à mobilité réduite, pour des tâches très routinières, pourrait être assurée par des robots bipèdes, car ceux-ci ont la faculté de pouvoir se déplacer sans adaptation particulière de l'environnement.

Si la faisabilité de tels systèmes reste largement hors d'atteinte pour ce qui est de robots aux capacités d'autonomie décisionnelle élevées, le niveau actuel de la technologie permet par contre d'envisager la réalisation de machines capables de se déplacer en marchant dans des conditions bien déterminées et d'exécuter quelques actions très simples.

#### 3.1.2. Problématique scientifique

##### 3.1.2.1. Conception générale

La difficulté de conception d'un robot marcheur bipède résulte, d'une part de la nouveauté du concept, qui fait qu'il n'existe pas encore de solutions éprouvées, et d'autre part de contraintes spécifiques au principe même de

la marche bipédique : tout d'abord, le système doit comporter un nombre élevé d'articulations dans un espace de volume réduit. De plus, la localisation de celles-ci est elle-même fort contrainte par des raisons de position des articulations, d'encombrement et de répartition des masses, ce qui nécessite par exemple l'étude de groupes moto-transmetteurs spécifiques. Par ailleurs, le système doit être en permanence en équilibre, soit statique, soit dynamique, ce qui peut nécessiter des couples instantanés élevés. Ceux-ci se répartissent d'ailleurs au cours du temps sur l'ensemble des articulations, posant ainsi le problème d'une gestion globale et dynamique de la puissance nécessaire. Ce dernier point est également lié aux choix technologiques concernant l'autonomie : la place disponible est faible et la masse embarquable limitée (elle se situe en général en hauteur (tronc) et a de ce fait une grande influence sur la dynamique du système).

Ce problème reste donc largement ouvert, l'état de l'art en la matière étant constitué par les très belles réalisations de Honda, les robots humanoïdes P2 et P3 présentés en 1997.

### 3.1.2.2. Modélisation

Un robot bipède peut être modélisé comme une chaîne articulée arborescente de corps rigides dans l'espace tridimensionnel. La marche est caractérisée par différentes phases [52][54], principalement (pour une jambe donnée) le balancement (35 % du cycle) et le support (65 % du cycle). Il existe de plus une phase de double support qui dure environ 12 % du cycle et qui est absente dans la course. Ces phases se décomposent elles-mêmes plus finement en fonction d'événements liés au mouvement du centre de gravité et, surtout, du pied. Ces différentes phases se caractérisent par des contacts divers entre le système et le sol.

Ainsi, le modèle mécanique d'un tel système comporte-t-il trois aspects :

- une dynamique de système rigide articulé libre dans l'espace représentable par des équations lagrangiennes ;
- un ensemble, variable selon les phases, de contraintes d'égalités et d'inégalités traduisant l'existence de contacts sans pénétration et sans glissement que *doit* respecter le système ; chaque ensemble définit un mode de fonctionnement ;
- un choix de loi d'impact modélisant les transitions (supposées instantanées) entre modes.

Nous sommes donc en présence d'un système dynamique hybride complexe, dont l'étude reste encore peu explorée.

### 3.1.2.3. Commande

Un marcheur humain adopte naturellement une allure régulière et symétrique dite *de confort* dans laquelle sa consommation d'énergie est minimale pour une vitesse de progression raisonnable. Par ailleurs, certaines classes de systèmes mécaniques hybrides, par exemple un robot sauteur ou une transmission avec jeu, présentent souvent des comportements cycliques limites correspondant à des équilibres dynamiques, parfois mêmes naturellement stables dans un certain domaine. Dans le cas du robot marcheur le plus simple, le compas sur une pente, ces cycles correspondent à des trajectoires périodiques passives (sans actionnement extérieur), dans lesquelles la transition entre énergie cinétique et énergie potentielle est entièrement équilibrée par l'absorption d'énergie à l'impact [47].

Tout ceci nous incite donc à rechercher une approche de la commande dans laquelle les trajectoires sont cycliques et énergétiquement optimales, en un sens qui reste à préciser. Un autre point est que ce qui importe vraiment est la progression globale du robot tout en préservant une stabilité mécanique particulière qui est de nature dynamique. Les approches classiques, comme le suivi précis de trajectoires articulaires figées sont donc inadaptées, sauf si l'on s'intéresse principalement au contrôle de la posture. Le domaine n'étant pas lui-même stabilisé (et loin s'en faut), le chercheur explorera donc des techniques de commande variées : optimisation non-différentiable, commande prédictive, commande par apprentissage itératif, commande par fonction de tâches [6]... On n'oubliera pas enfin la commande référencée capteurs [3], qui permettra de prendre en compte des mesures locales de distance, de proximité, de réaction au sol...

## 3.2. Analyse, modélisation et commande de systèmes dynamiques non-réguliers

**Mots clés :** *systèmes mécaniques, impacts, contraintes unilatérales, complémentarité, modélisation, analyse, simulation, commande, analyse convexe.*

### 3.2.1. Généralités

Les systèmes dynamiques (de dimension finie ou infinie, mais nous nous contenterons de systèmes de dimension finie) sont dits non-réguliers à partir du moment où leur modèle comporte des ingrédients impliquant une non-différentiabilité de l'état. Cette non-différentiabilité peut provenir de différentes sources (par exemple une excitation extérieure de type impulsive, qui conduit à ce que l'on appelle des équations différentielles à mesure). Une classe importante de tels systèmes est composée des systèmes dynamiques de complémentarité, qui sont d'une façon générique décrits comme suit :

$$\left\{ \begin{array}{l} \dot{x} = f(x, u, \lambda) \\ \mathcal{C}^* \ni y \perp \Lambda(\lambda) \in \mathcal{C} \\ g(y, \lambda, u, x, t) = 0 \\ \text{Loi de ré-initialisation de l'état } x(\cdot) \end{array} \right. \quad (1)$$

où  $\mathcal{C}^*$  et  $\mathcal{C}$  sont deux cones pôlaires,  $\perp$  est l'orthogonalité,  $\lambda$  est un multiplicateur,  $u$  une entrée de commande,  $g(\cdot)$  et  $\Lambda$  des fonctions. Ces systèmes dynamiques peuvent être considérés de deux points de vue différents : le point de vue *systèmes dynamiques hybrides* et le point de vue *inclusions différentielles*. L'approche hybride provient du fait qu'il est naturel de définir différents *modes* de fonctionnement à partir de  $y_i = 0$  ou  $y_i > 0$ , où  $y_i$  est une composante du vecteur  $y$ . L'approche par inclusions différentielles provient basiquement de l'équivalence entre les conditions de complémentarité  $0 \leq y \perp \lambda \geq 0$  et l'inclusion  $-\lambda \in \partial\psi_{\mathbf{R}^+}(y)$ , où  $\psi_{\mathbf{R}^+}(\cdot)$  est la fonction indicatrice de  $\mathbf{R}^+$  (qu'on peut en mécanique assimiler à un potentiel « unilatéral »), et  $\partial$  est sa sous-différentielle au sens de l'analyse convexe. On voit donc aisément à partir de (1) que cette dynamique peut se réécrire comme une inclusion. Lorsque le passage d'un mode à l'autre ne peut se faire qu'avec un saut dans l'état  $x(\cdot)$ , alors la dynamique continue de (1) comporte une mesure de Dirac, et Moreau définit alors le terme d'inclusion différentielle à mesure. Ceci dit, tous les systèmes de complémentarité ne sont pas à mesure, certains ayant une solution  $x(\cdot)$  absolument continue.

Dans (1), les deuxième et troisième lignes définissent donc les modes du système hybride ainsi que les conditions pour que les transitions entre ces modes se produisent, alors que la quatrième ligne définit la façon dont les transitions sont effectuées par l'état continu  $x(\cdot)$ .

### 3.2.2. Applications

Les systèmes (physiques ou abstraits) qui peuvent être représentés par des modèles tels que (1) sont nombreux : Systèmes mécaniques avec contraintes unilatérales et frottement sec (le robot bipède est un exemple typique, chaînes cinématiques avec jeu, toutes tâches robotiques comportant du contact unilatéral, phénomènes de *liquid slosh...*), circuits électriques avec diodes et/ou transistors MOS idéaux, commande optimale avec contraintes sur l'état, boucle fermée d'un système commandé par un algorithme MPC, etc.

Pour ces systèmes, une approche unifiée peut se révéler très utile afin d'élucider certaines de leurs propriétés liées à la commande (stabilisation, commandabilité, observabilité, identification), ou bien les problèmes plus mathématiques (existence, unicité, dépendance continue par rapport aux conditions initiales, bifurcations), voire pour la simulation numérique qui est évidemment un aspect très important.

L'intérêt de cette classe de modèles réside principalement dans le fait qu'elle n'est pas trop large, donc permet des études poussées, mais est en même temps assez riche pour inclure de nombreuses applications. Il ne semble pas raisonnable d'attaquer le problème des systèmes dynamiques hybrides dans sa généralité.

Par contre, se concentrer sur des sous-classes de tels systèmes se révèle très fructueux. Par exemple, il est important de noter que (1) est un système hybride « continu », dans le sens que ce sont les variables continues  $x$  et  $u$  qui sont prépondérantes dans l'évolution (par exemple, il n'y a pas de commande discrète qui permettrait de commuter d'un mode à l'autre : seul le signal  $u$  peut être utilisé).

### 3.2.3. Problèmes ouverts

Les problèmes ouverts sont nombreux. Nous nous concentrons essentiellement sur les aspects numériques et de commande, avec quelques excursions vers des problèmes liés à la nature des solutions (bifurcations, problèmes de Painlevé dans les systèmes mécaniques avec frottement sec).

## 3.3. Contrôle/commande temps-réel de systèmes robotiques complexes

**Mots clés :** *architecture de contrôle, contrôle/commande, systèmes embarqués, programmation synchrone, vérification formelle, environnement de programmation, temps-réel, systèmes hybrides.*

### 3.3.1. Programmation des contrôleurs hybrides

Un des problèmes principaux de la programmation des systèmes robotiques est d'aborder dans un cadre cohérent la description de l'évolution dynamique des deux composantes - continue et discrète - de ces systèmes hybrides. Ceci nécessite d'intégrer différents formalismes, trop souvent spécialisés dans un domaine précis et déconnectés les uns des autres. Ainsi, l'étude des *architectures de contrôle* est primordiale pour développer concepts et méthodes permettant de gérer la complexité de la spécification et de l'analyse de la globalité du système.

Un contrôleur de robots doit être capable de traiter une grande diversité d'actions, allant par exemple de la commande d'une cellule flexible d'assemblage en milieu industriel au contrôle d'un véhicule autonome opérant en milieu hostile. La diversité des applications potentielles en robotique et le désir de mettre en œuvre des algorithmes de commande sophistiqués impliquent une ouverture du système de programmation. D'un point de vue industriel, les contrôleurs actuels restent le plus souvent des machines fermées, dotées d'un langage limité ne permettant pas d'exécuter des actions complexes telles que des commandes référencées capteurs. Outre leurs limitations fonctionnelles, ils ne permettent pas de traiter correctement les aspects temps-réel sous-jacents à toute application robotique, même simple.

### 3.3.2. L'environnement de conception Orccad

L'environnement de contrôle ORCCAD [7][1] propose actuellement deux niveaux : le niveau *fonctionnel*, où les aspects commande en temps discrétisé sont prépondérants, et le niveau *contrôle*, qui gère principalement les aspects réactifs. Au niveau fonctionnel, les actions élémentaires sont définies sous forme de Tâches-Robot : ce concept clé spécifie dans la même entité une partie algorithmique (loi de commande) et une partie logique réactive. Il s'agit d'un objet informatique hybride, à l'interface des aspects temps continu et discret. En l'absence de modèles unifiés et opérationnels des systèmes hybrides, cette approche permet de cantonner l'interface temps continu/discret dans la coquille réactive de la Tâche-Robot. Les actions élémentaires exécutées par le robot sont réalisées par l'exécution périodique d'une loi de commande en boucle fermée dont la conception repose sur les techniques de l'automatique classique comme la spécification par fonction de tâches [6], la commande référencée capteurs ou encore la commande instationnaire pour systèmes non holonomes. Cette loi de commande est *encapsulée* dans un comportement logique réactif rythmant son exécution à l'aide de signaux typés (pré-conditions, exceptions et post-conditions) constituant sa *vue externe*. Ce comportement réactif est codé à l'aide du langage synchrone ESTEREL, ce qui permet de bénéficier des outils de vérification formelle associés FC2TOOLS/ATG.

Au niveau contrôle, les actions complexes sont spécifiées sous la forme de Procédures-Robot par composition structurée et hiérarchique de Tâches-Robot, manipulées par l'intermédiaire de leur vue externe, et de traitements d'exceptions. À la différence de ces dernières, les Procédures-Robot n'ont pas de partie commande, autre que celle des Tâches-Robot qui les composent. Nous pouvons ainsi définir de façon cohérente et dans un même formalisme des actions de complexité croissante, gérant les modes nominaux d'une mission robotique

complexe ainsi que les modes dégradés dépendant des exceptions spécifiées et du contexte d'exécution. Tous ces aspects logiques sont également spécifiés en ESTEREL, du niveau le plus haut (mission) jusqu'aux appels système gérant l'exécution des lois de commande, un soin tout particulier étant pris quant à la gestion des transitions entre commandes successives. Ceci nous permet d'effectuer *a posteriori* une vérification formelle des programmes produits à un grand niveau de détail.

La formalisation des structures manipulées présente de nombreux avantages permettant la définition d'un environnement de programmation cohérent et convivial [51] :

- Ceci permet de concevoir des interfaces de programmation adaptées à chaque type d'utilisateur du système. Ainsi, l'automaticien chargé du développement d'une Tâche-Robot peut en coder le comportement réactif sans rien connaître à ESTEREL, la vue externe de la Tâche-Robot étant générée automatiquement à partir d'une fenêtre graphique. D'autre part, le concepteur de mission ne code que la partie spécifique de son application, l'essentiel du code source, et en particulier celui permettant la connexion avec le système d'exploitation sous-jacent, étant généré automatiquement de façon totalement transparente.
- L'identification de certaines propriétés génériques d'un système ainsi structuré (vivacité, sûreté) permet d'automatiser partiellement la génération de critères abstraits facilitant ainsi l'utilisation des outils de vérification.
- Le code temps-réel téléchargeable est automatiquement généré à partir des spécifications de haut niveau.

### 3.3.3. Développements futurs et problèmes ouverts

De nombreux travaux restent cependant à réaliser et certains problèmes restent ouverts :

- En tant qu'elle vise la conception de systèmes embarqués temps-réel à sûreté critique, la génération de code doit être améliorée afin de produire du code réparti optimisé et tolérant aux pannes.
- L'utilisation des méthodes de vérification formelle actuelles reste difficile pour un non-spécialiste du domaine, notamment en ce qui concerne le diagnostic et l'interprétation des résultats. Nous nous heurtons également rapidement à des problèmes de taille d'automates à vérifier, même si la méthodologie d'ORCCAD permet d'effectuer une spécification et des vérifications incrémentales. La prise en compte de contraintes temporelles n'est pas actuellement réalisée.
- Enfin, il manque au niveau supérieur une couche *décisionnelle* de type planification réactive, permettant une éventuelle reprogrammation partielle de la mission en cas de défaillance non spécifiée ou encore de spécifier des missions complexes de façon conviviale en évitant des fautes ou oublis de spécification. Nous fondons de sérieux espoirs sur l'utilisation de techniques de synthèse de contrôleurs pour systèmes à événements discrets, initialisés par Ramadge et Wonham [50], pour construire ce niveau sur un formalisme mathématique solide.

Nous proposons ainsi, dans un environnement cohérent, un ensemble d'outils intégrés pour le support de ces méthodes et concepts bien formalisés ; ils permettent de programmer, de valider et de générer du code, de manière transparente pour l'utilisateur.

## 4. Domaines d'application

**Mots clés :** *robotique, système embarqué, mécanique, robot marcheur.*

Les domaines d'applications des robots marcheurs sont principalement ceux de la robotique non-manufacturière. Plus précisément, le projet viserait idéalement la robotique d'assistance (personnes âgées, handicapés) et d'intervention en milieu hostile terrestre, comme le nucléaire, en tant que secteurs applicatifs. Le premier domaine est également concerné par nos activités en biomécanique ; celles-ci ont aussi des applications dans le domaine du matériel à usage sportif. Les techniques de commande référencée vision

sans étalonnage étudiées dans le projet trouvent quant à elles des applications dans d'autres domaines, dont la robotique manufacturière (manipulation, soudage, inspection) et les robots mobiles.

Les travaux concernant la programmation sûre sont d'une portée très large puisque s'appliquant à une large classe de systèmes critiques. Sont visés en particulier les systèmes présentant une forte interaction avec l'environnement, par le biais de nombreux capteurs et actionneurs, comme les véhicules automatiques ou les engins sous-marins autonomes. Le domaine d'application peut s'élargir aux systèmes de contrôle/commande pour la production, et aux automates programmables, comme le suggèrent les contacts industriels liés à ORCCAD.

Les applications concernant les systèmes dynamiques non-réguliers sont nombreuses, en mécanique mais aussi en électronique. Un domaine très important est le prototypage virtuel, qui nécessite des algorithmes de simulation adéquats. De tels systèmes ne peuvent être intégrés par des méthodes classiques pour l'intégration des ODE ou des DAE. Par exemple les accumulations finies d'événements, qui sont fréquentes en mécanique (infinité de rebonds en temps fini), requièrent des techniques très spécifiques.

## 5. Logiciels

**Participants :** Soraya Arias [Moyens robotiques, correspondant], Daniel Simon, Olivier Testa.

**Mots clés :** *robotique, contrôle/commande, temps-réel, spécification, vérification.*

ORCCAD (Open Robot Controller Computer Aided Design) est un environnement logiciel permettant de concevoir et de mettre en œuvre le contrôle et la commande d'un système robotique complexe. Il permet également la spécification et la validation des missions à réaliser par ce système.

### 5.1.1. Fonctionnalités d'Orccad.

ORCCAD est principalement destiné aux applications temps-réel critiques en robotique, dans lesquelles les aspects relevant de l'automatique (les asservissements, les commandes) sont amenés à interagir étroitement avec ceux manipulant des événements discrets. De tels systèmes sont souvent qualifiés d'hybrides. ORCCAD est conçu et développé en commun entre les projets BIP et ICARE (Sophia Antipolis) et le service des Moyens Robotiques de l'UR Rhône-Alpes. Ses principaux constituants sont :

- un éditeur de composants logiciels élémentaires (Modules),
- un éditeur graphique pour la spécification de Tâches-Robot,
- un éditeur de Procédures-Robot, générant automatiquement la plus grande partie du code de contrôle ESTEREL,
- un langage de spécification de missions robotiques (MAESTRO),
- une interface de vérification générant des critères abstraits pour les outils FC2TOOLS et ATG,
- une connexion avec des simulateurs logiques (XES) ou hybrides (SIMPARC),
- un générateur de code temps-réel pour VXWORKS, SOLARIS ou LINUX.

### 5.1.2. Version diffusée.

ORCCAD V3.1 est distribué sur une demi-douzaine de sites académiques à des fins d'évaluation. Une présentation du logiciel est disponible à l'URL :

<http://www.inrialpes.fr/iramr/pub/Orccad/>

Cette version dispose des fonctionnalités suivantes : un générateur de code pour le simulateur SIMPARC (Jean-Jacques Borrelly, INRIA-SOPHIA-ANTIPOLIS), un exécuteur pour VXWORKS 5.2 et 5.3, pour SOLARIS 6 et 8 ainsi que pour LINUX Red Hat 6.1.

ORCCAD présente une partie graphique développée sous Ilog Views 3.11. Il est disponible à la fois sous SOLARIS 6 et sous LINUX (RedHat 6.1). Il supporte la version 5.21 (et suivantes) d'ESTEREL ainsi que des outils associés (ATG, XES) et compatibles avec cette version.

### 5.1.3. Nouveaux développements.

Cette année les projets suivants ont été mis en chantier :

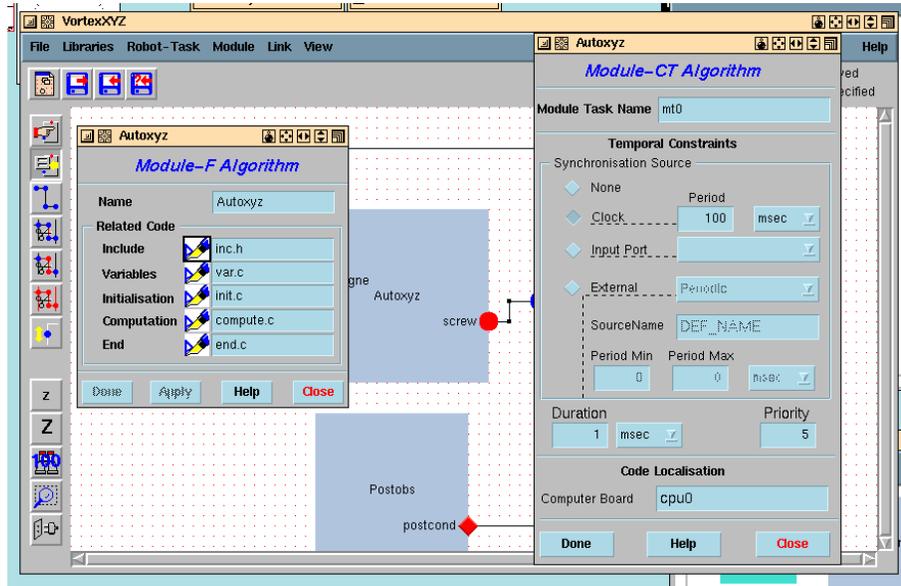


Figure 1. Éditeur de Tâches-Robot

- fiabilisation de la version multi-cadence, en particulier au niveau de la logique de contrôle d'exécution des modules ;
- finalisation de l'interfaçage entre interface de spécification multi-cadence, analyse d'ordonnancement dans ERS et générateur de code [11][35] ;
- portage sur RTAI (exécution temps-réel dans l'espace noyau) ;
- réécriture de l'interface graphique JAVA (en cours) ;
- réécriture du générateur de code pour production de code source C (en cours) ;
- interfaces JAVA de dialogue en ligne avec l'opérateur et de visualisation de simulation de robots mobiles [43].

## 6. Résultats nouveaux

### 6.1. Modélisation et commande

**Participants :** S. Arias [M.R.], C. Azevedo, J.-M. Bourgeot, B. Brogliato, C. Canudas de Wit [LAG], N. Cislo [UFRAPS], B. Espiau, P. Poignet [LIRMM], P. Sardain [LMS], P.-B. Wieber [NUMOPT].

#### 6.1.1. Génération de trajectoires de marche 3D

Le problème de la génération de trajectoires de marche pour le robot BIP a été abordé sous l'angle de la commande optimale : minimiser la consommation d'énergie tout en réalisant un mouvement cyclique avec une longueur de pas donnée. L'algorithmique envisagée a été totalement spécifiée, jusqu'à préciser les formules de la consommation énergétique à minimiser, des contraintes dynamiques à satisfaire, ainsi que de leurs gradients respectifs dans le cas particulier du robot BIP. L'implémentation de ces algorithmes a débuté en s'appuyant sur les outils de calculs symbolique et numérique Maple et Scilab, avec des résultats concluants en l'état actuel.

#### 6.1.2. Commande prédictive pour la locomotion artificielle

Le problème de la synthèse de la locomotion bipède artificielle est abordé en intégrant les principes de base qui régissent le contrôle de la marche chez l'humain. Cette démarche nous a permis de développer une stratégie originale pour la commande de robots. L'intérêt principal de notre approche est qu'elle s'affranchit

de la définition de mouvements de référence, et dote le système de capacités d'anticipation et d'adaptation aux événements et aux changements d'environnement. Les contraintes internes et externes au robot sont prises en compte dans la formulation de cette loi de commande. Nous nous sommes intéressés aux mécanismes intrinsèques qui régissent le contrôle de la locomotion anthropomorphe, en recherchant ses causes et non pas seulement ses effets. Les principes qui en sont déduits sont : absence de suivi de trajectoire de référence ; distinction explicite entre contrôle de la posture et commande de la marche ; utilisation de critères d'optimisation adaptatifs ; adaptation et anticipation. Cette analyse nous a conduit à proposer un schéma original de type commande prédictive (au sens horizon fuyant) non linéaire sous contraintes pour le contrôle des robots bipèdes, qui permet de conserver les capacités d'anticipation existantes chez l'homme. Le mouvement est spécifié de façon implicite par un jeu de contraintes inégalités s'adaptant à la situation rencontrée. Le but n'est pas de modifier les paramètres en fonction du déroulement du déplacement du robot, mais de proposer des contraintes qui s'adaptent à l'environnement et aux événements. Le modèle dynamique du robot fait partie des contraintes du problème d'optimisation, au même titre que les limitations internes du système (butées, saturations...). La modélisation retenue tient compte dans sa formulation des contacts, impacts et décollements. Ce travail théorique et algorithmique est validé par des résultats de marche obtenus en simulation sur diverses structures de robots dans diverses situations. L'application de la méthode aux cas des robots BIP (anthropomorphe) et Rabbit (sous actionné) met en avant la portabilité de l'algorithme. Nous avons pu également valider notre technique en faisant varier les types de déplacements : sol plat, obstacles, escaliers, poussée dans le dos... Malgré les points qui restent encore à approfondir pour envisager la mise en œuvre sur un prototype bipède (temps de calcul, robustesse...), les résultats de simulations offrent des perspectives très intéressantes. Ce travail est poursuivi par F. Lydoire dans le cadre d'une thèse au LIRMM (Montpellier). Nous envisageons l'application de notre technique dans le cadre de la réhabilitation de la marche par électro-stimulation fonctionnelle (FES).

### **6.1.3. Activités sur le prototype BIP**

Après deux ans d'immobilisation, la plate-forme expérimentale BIP a été reprise à zéro, de l'étalonnage de la mécanique et des capteurs jusqu'au test de chaque élément logiciel, ce qui a permis de débusquer un bug important malencontreusement introduit au cours de ces deux années, mais au prix d'un effort conséquent.

En parallèle, puisque ce robot n'est pas encore équipé de capteurs extéroceptifs, un observateur de sa position et de son orientation dans l'espace a été mis au point en inférant les positionnements successifs des pieds, c'est-à-dire en quelque sorte par odométrie. Malgré tout, la fonction de tâche envisagée pour la commande du robot a été redéfinie afin de la rendre indépendante de cette position et de cette orientation, ce qui n'était pas le cas précédemment.

Par ailleurs, un audit a été réalisé des besoins et des différentes possibilités d'extension de la capacité de calcul du robot, ce qui a amené à déporter l'essentiel des calculs sur un ordinateur externe tournant sous LINUX standard, relié au robot par une connection IP.

Une autre activité expérimentale a concerné la capture de mouvements humains grâce à un système Optotrack, en vue de leur reproduction en simulation puis en réel par le robot BIP. Ceci a amené à mettre au point un algorithme de type quasi-Newton qui permet de reconstruire en temps-réel la configuration du robot qui s'approche au mieux de la posture de la personne.

### **6.1.4. Systèmes mécaniques non-réguliers**

Les résultats et travaux récents portent sur les points suivants :

- L'extension du théorème de la passivité lorsque l'on considère des non-linéarités multivoques. Ce thème fait l'objet d'un travail en commun avec le projet NUMOPT de l'INRIA-RHÔNE-ALPES. Ce travail est étendu au cas de la stabilité d'une classe d'inéquations variationnelles, où l'on montre que la dynamique sur le bord du convexe peut modifier notablement la stabilité.

- Un survol et la présentation d'un cadre général d'étude pour les robots bipèdes [33]. Ceci s'insère dans un cadre plus général d'étude des systèmes dynamiques de complémentarité [44][13][12]. Nous poursuivons également l'étude de la stabilisation de trajectoires pour les systèmes Lagrangiens de complémentarité. Il s'avère que les aspects non-réguliers et les aspects hybrides (systèmes à événements discrets couplés) compliquent sérieusement la tâche. Dans [17], nous proposons une étude sur la stabilisation des systèmes avec du jeu, ainsi qu'une étude sur l'existence de cycles limites. Notons que les travaux sur les hélicoptères font également intervenir de tels modèles pour les phases d'atterrissage et de décollage.
- L'étude de la commandabilité d'une classe de systèmes mécaniques non-réguliers, appelés *jongleurs* [25]. La caractérisation des espaces atteignables est un pas important vers l'obtention de critères de commandabilité. Ensuite viendra le temps de la stabilisation de trajectoires.
- L'étude des bifurcations introduites par les paradoxes de Painlevé dans des systèmes mécaniques simples avec une contrainte unilatérale et frottement de Coulomb [16].
- L'application du contact de Hertz au calcul de coefficients de restitution analytiques en élastique, visco-élastique, visco-élasto-plastique [32]. Ce travail étant effectué, nous nous concentrons sur l'étude de lois de chocs multiples, faisant intervenir des paramètres physiques et s'insérant dans le cadre général thermodynamique défini par M. Frémond à partir de la théorie des superpotentiels de J.-J. Moreau, ceci en vue d'améliorer le logiciel de simulation de Schneider Electric [18].

## 6.2. Aide à la conception de systèmes temps-réel de contrôle/commande

**Participants :** K. Altisen [VERIMAG], S. Arias [M.R.], A. Bindal, O. Clodic, F. Giraud, A. Girault, H. Marchand [VERTECS, INRIA-RENNES], A. Medina, T. Neveu, E. Rutten, F. Salpérier, O. Sename, D. Simon, Y. Sorel [OSTRE, INRIA-ROCQUENCOURT].

### 6.2.1. Tolérance aux pannes

Nous poursuivons nos travaux commencés dans le cadre de l'ARC TOLERE, avec un nouveau thésard Hamoudi Kalla, co-encadré par Alain Girault et Yves Sorel. Le but global est la génération automatique de code réparti tolérant aux pannes. Nous avons implanté la méthode proposée dans [46]. Cette méthode est basée sur la réplique active des opérations de calcul, d'entrée/sortie et de communication. Nous l'avons appelée FTBAR pour « Fault-Tolerance Based Active Replication ». Or, l'ordonnancement de  $k + 1$  copies actives de chaque opération sur des processeurs différents engendre un important surcoût sur les liens de communications. Afin de réduire ce surcoût en communication, nous avons amélioré la méthode par l'ordonnancement, en plus de ces  $k + 1$  copies, de  $r$  copies supplémentaires d'opérations de calcul et d'entrée/sortie sur des processeurs différents, chacune de ces  $r$  copies remplaçant au moins une opération de communication et diminuant le temps de calcul total de l'ordonnancement.

Nous avons implanté et intégré l'heuristique FTBAR dans l'outil SYNDEX développé par le projet OSTRE à l'INRIA-ROCQUENCOURT. Afin de mesurer l'efficacité et la performance de notre méthode, nous avons choisi de la comparer avec la méthode HBP proposée par Hashimoto et al. dans [48], qui est la méthode la plus proche de la nôtre trouvée dans la littérature. Comme HBP est dédiée aux architectures homogènes, nous avons restreint le cadre de cette comparaison aux architectures homogènes.

Nous avons appliqué les deux méthodes FTBAR et HBP à des graphes architecture et algorithme générés aléatoirement. Ces graphes sont produits à l'aide de deux générateurs aléatoires de graphes que nous avons proposés et implantés. Les figures 2(a) et (b) donnent le surcoût moyen dû à la tolérance aux pannes pour FTBAR et HBP en fonction de la taille du système, respectivement en l'absence de panne et quand un des processeur tombe en panne. Ces résultats démontrent l'efficacité de FTBAR par rapport HBP, ce qui est un encourageant.

### 6.2.2. Recherche de chemins disjoints dans un réseau de processeurs

Nous considérons un réseau de processeurs reliés par des liaisons point-à-point. Notre but est de trouver tous les chemins de communication disjoints partant d'un processeur source donné et aboutissant à un

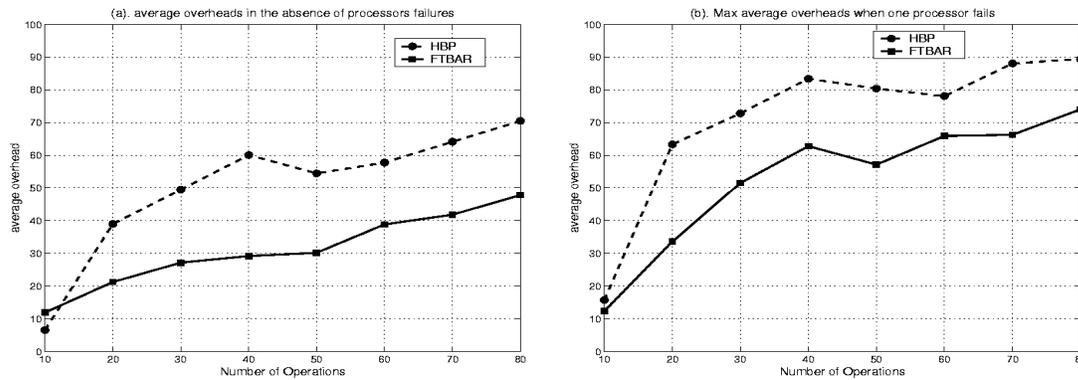


Figure 2. (a) Surcoût de la tolérance aux pannes en l'absence de panne. (b) Quand un des processeurs tombe en panne.

processeur destination donné. Par disjoint nous entendons que deux chemins ne doivent avoir en commun aucun processeur autre que le processeur source et le processeur destination. Notre motivation est la *tolérance aux pannes*, avec l'idée qu'un des chemins ainsi trouvés sera le chemin principal, alors que les autres chemins seront les chemins de secours.

Il existe deux classes d'algorithmes pour trouver les chemins disjoints dans un graphe : les algorithmes *globaux* qui nécessitent la connaissance complète de la topologie du réseau, et les algorithmes *locaux* qui ont besoin uniquement que chaque processeur connaisse tous ses voisins. Un autre point de vue est qu'un algorithme global doit être exécuté *hors-ligne*, alors qu'un algorithme local peut très bien être exécuté *en-ligne*, et donc dans un contexte où le réseau est *dynamique* (panne dynamique des processeurs et des liens de communication, possibilité de rajouter dynamiquement des nouveaux processeurs...). L'algorithme que nous avons mis au point est un algorithme local. Dans le cadre du stage d'Anuj Bindal (IIT Delhi), nous avons programmé cet algorithme avec des threads, programmé également l'algorithme qui donne le résultat optimal (algorithme global qui parcourt le réseau complet), et généré aléatoirement plusieurs réseaux de processeurs suivant la méthode de Waxman [53]. Cela nous a permis de produire des « benchmarks ». Ceux-ci indiquent que notre algorithme local trouve en moyenne plus de 80% du nombre total de chemins disjoints existant. Ceci est un très bon résultat qui nous encourage à poursuivre nos travaux, notamment en comparant notre algorithme à AODV (« Ad-Hoc On Demand »<sup>1</sup>) et en le simulant sous NS (« Network Simulator »<sup>2</sup>).

### 6.2.3. Répartition automatique de programmes synchrones

Dernièrement, nous avons plus particulièrement travaillé à l'extension aux nouvelles formes de compilation du langage ESTEREL de résultats antérieurs sur la répartition de programmes synchrones [2]. La motivation est que les travaux précédents sur la répartition se basaient sur le format intermédiaire en automate d'états fini, format qui ne permet pas de compiler les gros programmes à cause de l'explosion combinatoire liée au parallélisme. Ce format est communément appelé OC. Concrètement, nous avons donc travaillé sur deux autres formats intermédiaires : les circuits séquentiels d'une part (appelé SC), et le format propre au compilateur de France Telecom R&D d'autre part (appelé CP). Ces trois formats intermédiaires diffèrent de par la nature de la structure de contrôle des programmes. Ceci est résumé dans le tableau suivant :

Nous avons donc proposé un algorithme de répartition de programmes SC, qui fonctionne sur le même principe que celui pour les programmes OC [28]. A cause de la nature parallèle et dynamique de la structure de contrôle des programmes SC, cet algorithme est plus basique, c'est-à-dire qu'il réalise beaucoup moins

<sup>1</sup>AODV : <http://moment.cs.ucsb.edu/AODV/aodv.html>

<sup>2</sup>NS : <http://www.isi.edu/nsnam/ns>

Table 1.

format	structure du contrôle		
OC	séquentielle	explicite	statique
CP	parallèle	explicite	statique
SC	parallèle	implicite	dynamique

d'optimisations sur le nombre et le placement des émissions et réceptions de messages entre les sites de calcul. Cet algorithme a été mis en œuvre dans l'outil SCREP<sup>3</sup>.

Par ailleurs, dans le cadre du stage de Fabien Giraud, co-encadré par Alain Girault et Etienne Closse (FT R&D), nous avons mis en œuvre la répartition automatique dans le compilateur SAXO-RT de France Telecom R&D [38]. Ici, les algorithmes mis en jeu sont très proches de ceux décrits dans [2] car nous avons œuvré au niveau des tâches séquentielles associées aux points de contrôle [15].

#### 6.2.4. Répartition de programmes *Lustre dirigée par les horloges*

Nous avons poursuivi et concrétisé des travaux antérieurs menés en collaboration entre Alain Girault et Xavier Nicollin (VERIMAG). Ces travaux portaient sur une méthode utilisant le répartiteur OCREP<sup>4</sup> permettant de répartir automatiquement un programme LUSTRE en fonction de ses horloges et de directives de placement fournies par l'utilisateur. À notre connaissance, la répartition dirigée par les horloges est la seule méthode permettant de prendre en compte des tâches de longue durée dans des programmes synchrones, ce qui restait jusque-là un inconvénient des langages synchrones.

Dans le cadre du stage de Fabrice Salpêtrier, nous avons réalisé une interface d'aide à la répartition [41]. Elle permet de charger un programme LUSTRE, de l'analyser, d'afficher son arbre des horloges décoré avec les entrées et sorties du programme, d'aider l'utilisateur à choisir ses directives de répartition, et d'invoquer le répartiteur OCREP avec les bonnes options.

#### 6.2.5. Génération automatisée de contrôleurs

Nous poursuivons notre exploration de méthodes d'application de la synthèse de contrôleurs discrets, dans le cadre de la programmation de systèmes de contrôle-commande. L'approche est de définir des composants de base de construction de modèles, facilement composables, et présentant les états et événements contrôlables qui permettent d'assurer des objectifs de base. Dans la perspective d'une utilisation automatisée de la synthèse de contrôleur discret, un utilisateur définit son système en composant de tels modules de base, choisit ses objectifs à partir de propriétés qui lui sont proposées, et peut alors obtenir un contrôleur correct, sans que tout ceci ne requière une compétence forte en modèles et algorithmes de synthèse.

Nous avons défini des schémas génériques de tâches, qui répondent à des requêtes d'activation soit par un démarrage, soit par une mise en attente, ceci selon un événement contrôlable, dont la valuation sera justement l'objet de la synthèse de contrôleur. Les objectifs de synthèse sont des contraintes logiques génériques (exclusion, ou implication) d'activation pour un sous-système, ou entre différents sous-systèmes. Ces premiers résultats ont été illustrés par le traitement d'une étude de cas de système interactif (la commande manuelle d'un système d'excavation) [34][30]. Cette approche de systèmes multi-tâches a été étendue à des schémas de tâches multi-modes, décrites par automate hiérarchique, où les modes d'activité (par exemple, des versions d'un algorithmes de commande) sont caractérisés par des poids modélisant une qualité (par exemple, la précision d'un algorithme dans ce mode), et coût (par exemple, en temps de calcul dans le cas de partage de cycle de processeur, ou en énergie). L'utilisation de la synthèse optimale permet alors d'obtenir automatiquement des contrôleurs pour différentes politiques de gestion de ces paramètres [31]. Ces résultats sont en cours de reformulation dans le cadre des automates hiérarchisés.

<sup>3</sup>SCREP : <http://www.inrialpes.fr/bip/people/girault/Screp>

<sup>4</sup>OCREP : <http://www.inrialpes.fr/bip/people/girault/Ocrep>

Des études de cas ont permis d'explorer des extensions de ces résultats, en les confrontant à des situations plus réalistes et plus complexes. L'une concerne un robot mobile nettoyeur, inspiré d'un système de la société Robosoft. Nous avons modélisé certaines des tâches contrôlant les brosses : rotation, élévation, extension, ainsi que des contraintes de fonctionnement, et obtenu des schémas de contrôle et des objectifs, puis un contrôleur [37]. Une autre étude de cas, en coopération avec ST Microelectronics [40], concerne un SOC (« *System On Chip* ») de codage/décodage MPEG. C'est un système multi-tâches, où on a une variété de modes selon la qualité de traitement de donnée, le volume de donnée produite, la consommation de temps, d'énergie... Il a une organisation en flot de données, avec communication par files (bornées), et débit entrant (caméra) et sortant (réseau). Nous avons modélisé ces tâches et différents objectifs, correspondant à différentes politiques d'optimisation selon les critères de consommation énergétique, de qualité d'image... [39]

De ces études de cas est ressortie une généralisation de notre approche, avec la perspective d'aboutir à la définition d'un langage de programmation localement impératif, globalement déclaratif, et dont la compilation intègre un calcul de synthèse de contrôleurs. Nous nous intéressons aussi à l'étude de la correspondance avec la programmation par aspects, dont la synthèse de contrôleur peut être une réalisation dans le cadre des systèmes réactifs. Nous commençons à explorer le sujet de la modélisation de systèmes avec leur défaillances, en vue d'obtenir par synthèse de contrôleurs des systèmes tolérants aux pannes, par commutation entre différentes configurations de fonctionnement, éventuellement dégradé.

Ce travail se fait en coopération avec :

- le projet VERTECS, IRISA/INRIA-RENNES (Hervé Marchand), dont nous appliquons les techniques de synthèse et utilisons l'outil de *model-checking* et synthèse SIGALI ;
- VERIMAG, pour l'approche généralisée (Florence Maraninchi, Karine Altisen) et pour l'utilisation du langage des Automates de Modes et l'outil MATOU (Yann Rémond), à partir duquel a été établie une passerelle vers SIGALI, et réciproquement un simulateur intégrant le contrôleur synthétisé ;
- le projet ESPRESSO, IRISA/INRIA-RENNES, dont nous utilisons l'environnement ISDT/Polychrony de programmation dans le langage SIGNAL, pour les spécifications ;
- et enfin le LAG (Hassane Alla, Alexia Gouin) pour des questions sur les techniques en informatique et automatique.

### 6.2.6. Ordonnancement régulé

Les applications de contrôle/commande, que l'on trouve par exemple en robotique, nécessitent d'exécuter des activités informatiques ayant des caractéristiques temporelles différentes : commandes échantillonnées à différentes fréquences, événements asynchrones, changements de mode de marche..., induisant une charge de calcul variable sur le système. D'autre part, la détermination des paramètres d'ordonnancement de la commande en boucle fermée d'un système non-linéaire n'est généralement pas possible de façon théorique.

Ces divers processus partagent un support d'exécution de capacité bornée, et doivent respecter des contraintes temps-réel dont le respect est crucial en terme de performances et de stabilité. Les méthodes classiques d'ordonnancement (affectation statique des valeurs de périodicité) ne sont pas capables de traiter efficacement les aléas temporels. Leur stricte application conduit généralement à une sous-utilisation importante de la puissance de calcul, et elles manquent de robustesse vis à vis des incertitudes de durée d'exécution des modules de programmes et des variations de charge dans un environnement dynamique.

Une solution alternative à l'affectation statique de paramètres d'ordonnancement consiste à réguler l'ordonnancement en boucle fermée, par exemple en ajustant la période d'activation de tâches en fonction d'un critère de commande à optimiser sous contrainte d'utilisation maximale de la ressource de calcul. Les premiers développements de cette méthode viennent aussi bien d'automaticiens [45] que d'informaticiens [49] : on peut alors parler d'*ordonnancement régulé* (« *feed-back scheduling* »).

Le principe général de l'architecture est décrit par la figure 3 où l'on trouve :

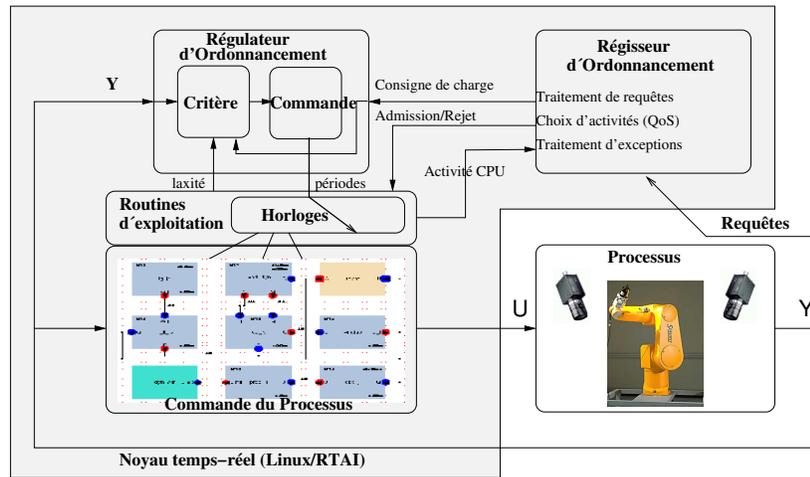


Figure 3. Structure d'une commande avec ordonnanceur régulé

- Le *régulateur*, qui calcule les paramètres d'ordonnancement (périodes) en fonction d'un signal d'erreur mesuré sur le processus commandé (par exemple, l'erreur de poursuite) et sur le contrôleur (charge CPU, laxités, dépassements d'échéances). Il s'agit là d'un régulateur périodique bénéficiant des outils de l'Automatique.
- Le *régisseur d'ordonnancement*, qui calcule le point de fonctionnement désiré du système informatique (par exemple, la consigne de charge CPU), gère l'acceptation ou le rejet de nouvelles activités, choisissant pour chaque action une variante possible fonction d'un critère de qualité de service et met en œuvre une politique de traitement d'exceptions restant à définir précisément. Ces aspects décisionnels fonctionnent sur une échelle de temps à événements discrets.
- Au niveau système, des utilitaires permettant d'évaluer le fonctionnement de la ressource de calcul (mesure de laxités, détection de surcharge...) et de générer des horloges à cadence variable.

La validité de ce concept est en cours d'évaluation dans le projet, sur un exemple que l'on peut considérer comme canonique en robotique : la commande d'un bras manipulateur. Le travail en cours consiste à :

- Identifier des relations entre paramètres d'ordonnancement (cadence/latence) et performances de la commande. Ces études utilisent soit les outils TrueTime et JitterBug associés à MATLAB/SIMULINK, soit des simulations réalisées grâce à la version multi-cadence d'ORCCAD.
- La mise en forme d'un critère associant les performances de la commande et celles du système temps-réel.
- La conception du régulateur discret correspondant et son expérimentation sur une application générée par ORCCAD, dont la version multi-cadence est maintenant suffisamment solide pour servir de socle de départ fiable.

Un des points clés est l'influence des retards (comme les latences entrées-sorties) sur la relation performances/ordonnancement de la loi de commande, ainsi que la robustesse du système de commande temps-réel aux variations de la période d'échantillonnage et des retards.

Les expériences en cours doivent également permettre d'évaluer les contraintes de mise en œuvre liées à ce concept, notamment concernant le sur-coût induit par la méthode et sa souplesse d'utilisation.

Des expériences préliminaires ont permis un premier test des outils informatiques mis en place sous forme d'une couche intergicielle entre RTAI et une application de simulation temps-réel de robot (figure 4).

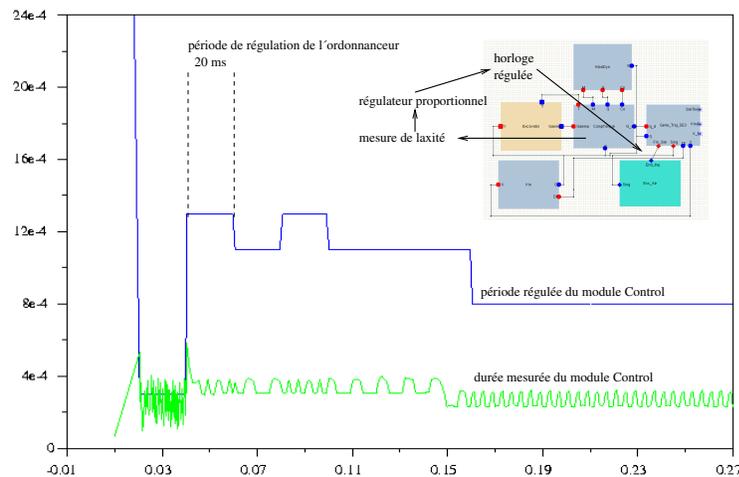


Figure 4. Structure d'une commande avec ordonnanceur régulé

## 7. Contrats industriels

### 7.1. Schneider Electric

V. Acary, dans le cadre de son post-doc co-encadré par B. Brogliato, et M. Abadie (Schneider Electric) sont impliqués dans un contrat post-doc CNRS-Schneider Electric, sur la simulation des disjoncteurs moyenne et basse tension.

### 7.2. ST Microelectronics

Nous sommes en contact avec des équipes de R&D de ST Microelectronics à Crolles. Nous étudions les potentialités de l'approche synchrone sur le flot de conception chez ST Microelectronics, particulièrement du point de vue de l'apport de la synthèse de contrôleurs discrets dans le cas de systèmes multi-tâches [40][39].

### 7.3. RNTL Automate

Le projet BIP participe au contrat RNTL AUTOMATE en collaboration avec les sociétés ATHYS(coordonnateur) et COMAU. Ce projet doit permettre de modéliser et vérifier formellement des composants d'automatisation utilisés sur des chaînes d'assemblage pour l'industrie automobile. ATHYS est une *start-up* créée en juillet 2000. COMAU est la nouvelle raison sociale de Renault Automation.

### 7.4. France Telecom R&D

Le projet a effectué un transfert industriel des algorithmes de répartition automatique de programmes ESTEREL vers l'équipe de France Telecom R&D qui réalise le compilateur SAXO-RT (compilateur ESTEREL vers code C embarqué) [38][15].

## 8. Actions régionales, nationales et internationales

### 8.1. Actions régionales

#### 8.1.1. Jessica

Dans le cadre du programme Jessica et en collaboration avec l'ESISAR, D. Simon a réalisé une expertise concernant le choix d'un système d'exploitation temps-réel et du micro-contrôleur associé pour une application embarquée en milieu sévère, développée par la société Ascorel (Vienne) [42].

### 8.2. Actions nationales

#### 8.2.1. GdR Automatique : « Commande de robots à pattes »

J.-M. Bourgeot participe au GdR Automatique du CNRS « Commande de robots à pattes ».

#### 8.2.2. GdR Automatique « Systèmes à retards »

O. Sename est co-responsable, avec M. Dambrine, du groupe « Systèmes à retards » du GdR Automatique<sup>5</sup>. Les objectifs du groupe sont orientés à la fois vers la recherche fondamentale (systèmes sur anneau, optimisation par LMI, robustesse...) et vers la recherche technologique (applications réseaux, téléopération, transports, santé... ainsi que développement d'outils logiciels dédiés de type boîtes à outils).

Ce groupe s'appuie sur une dizaine de laboratoires CNRS ou INRIA, a une bonne visibilité internationale, due en particulier à l'organisation des Workshops IFAC « Time Delay Systems », dont l'IFAC TDS 03, co-organisé par l'INRIA-ROCQUENCOURT et le LAAS-CNRS, et qui aura lieu à l'INRIA-ROCQUENCOURT en septembre 2003.

#### 8.2.3. Groupe COSED

A. Medina et E. Rutten participent à un groupe de travail COSED de l'EEA consacré à la commande opérationnelle des systèmes à événements discrets<sup>6</sup>. Il succède, en élargissant et renouvelant la thématique, au groupe consacré au Grafcet et aux formalismes pour les automatismes industriels.

#### 8.2.4. Projet Robea « électrostimulation des paraplégiques »

Le projet BIP (C. Azevedo, B. Brogliato) participe au projet Robea « Contrôle du mouvement du membre inférieur humain paralysé sous stimulation électrique » dirigé par D. Guiraud, avec le LIRRM et le Centre Propara (Montpellier, PUPH Rabishong). BIP apporte son expertise sur la commande des systèmes mécaniques non-réguliers. La collaboration comporte également une étude sur la modélisation des muscles pour la commande, en vue de simulations de la marche sur le robot bipède de l'INRIA. P.-B. Wieber (projet NUMOPT de l'INRIA-RHÔNE-ALPES) participe activement à cette activité.

#### 8.2.5. Pre-projet Robea « commande des hélicoptères »

B. Brogliato est impliqué dans le pré-projet Robea « Modélisation et Commande d'Hélicoptères » qui regroupe Heudiasyc de l'UT Compiègne (R. Lozano), l'Université d'Evry (T. Hamel), et l'Université d'Amiens (C. Pegard). Des contacts avec l'Onera de Salon de Provence (A. Desopper) sont également établis sur ce thème, et un sujet commun de DEA concernant la commande des phases d'atterrissage et de décollage a été proposé pour 2001/2002.

#### 8.2.6. Collaborations internes à l'Inria

- Service des Moyens Robotiques de l'INRIA-RHÔNE-ALPES, sur ORCCAD et sur la réalisation du robot bipède.
- Projet OSTRE de l'INRIA-ROCQUENCOURT, dans la suite de l'ARC TOLERE, et en lien avec les programmes français AEE (Architecture Electronique Embarquée) et européen EAST-EEA.

<sup>5</sup>GdR SAR : <http://www.ec-lille.fr/sar>

<sup>6</sup>COSED : <http://japura.lurpa.ens-cachan.fr/cosed>

- Projet VERTECS de l'INRIA-RENNES, sur l'utilisation de méthodes et outils de synthèse de contrôleurs discrets (H. Marchand).
- Projet TRIO de l'INRIA-LORRAINE, ainsi qu'avec le LIRMM, sur l'utilisation des algèbres (max,+), dans le cadre de l'action GARP de l'INRIA-LORRAINE.
- Action de recherche coopérative de l'INRIA FISC : formalisation et instrumentation des scénarios ; l'ARC FISC est une action de recherche coopérative de l'INRIA lancée en janvier 2001 et d'une durée de deux ans. Elle regroupe un ensemble d'équipes autour d'un thème commun : les langages de scénarios pour les télécommunications et l'automatique. Quinze chercheurs répartis dans quatre laboratoires participent à l'action. Les laboratoires impliqués sont : l'IRISA (Rennes), le LIAFA (Université Paris 7), l'INRIA-ROCQUENCOURT et l'INRIA-RHÔNE-ALPES (Grenoble).

### 8.2.7. Collaborations avec d'autres laboratoires

- La thèse de J.-M. Bourgeot, encadrée par B. Brogliato, est co-encadrée par C. Canudas de Wit (LAG).
- B. Brogliato est impliqué dans le pré-projet Robea « Modélisation et commande d'hélicoptères » qui regroupe Heudiasyc de l'UT Compiègne (R. Lozano), l'Université d'Evry (T. Hamel), et l'Université d'Amiens (C. Pegard). Des contacts avec l'Onera de Salon de Provence (A. Desopper) sont également établis sur ce thème. Un élève ingénieur de l'ENSIEG (G. Chevret) en troisième année à l'université de Karlsruhe, a effectué son stage de fin d'étude du 1<sup>er</sup> juin au 15 décembre 2002 sur le thème de l'atterrissage des hélicoptères.
- Nathalie Cislo (SPM), collaboratrice extérieure de BIP, assure le lien entre les recherches sur la locomotion bipède, humaine ou robotique.
- Alain Girault coopère avec VERIMAG (X. Nicollin) sur la répartition de programmes LUSTRE dirigés par les horloges.
- Eric Rutten coopère avec le LAG (équipe Conception de Systèmes Sûrs, H. Alla), sur l'application des techniques de synthèse de contrôleurs.
- Eric Rutten coopère avec VERIMAG (F. Maraninchi et K. Altisen) sur les automates de modes et la synthèse de contrôleurs.
- O. Sename collabore avec le LAG, en poursuivant des travaux qu'il menait auparavant au LAG, sur des domaines comme la commande de véhicules automobiles, l'étude des DVDs, l'identification et la commande de filière de production de fibre de verre, ou l'analyse et la commande de systèmes à retards.

### 8.3. Actions européennes

- Le projet BIP est membre depuis l'automne 1998 du réseau européen CLAWAR (« Climbing And Walking Robots »).
- Le projet BIP coordonne le projet européen SICONOS (« Simulation, modelling and Control of Non-Smooth dynamical systems »). Ce projet d'une durée de 4 ans a débuté le 1<sup>er</sup> septembre 2002.
- Le projet BIP participe au réseau européen ARTIST (« European Network of Excellence on "Advanced Real-Time Systems" »<sup>7</sup>), en particulier aux deux actions intitulées « Hard Real-Time Systems » et « Flexible Real-Time Systems for QoS Management ». Des chercheurs du projet ont participé au « kick-off meeting » à Pise (Italie) en avril, ainsi qu'au « review meeting and international collaboration day » à Grenoble (France) en octobre.
- Le projet BIP participe comme observateur aux travaux du projet OROCOS (IST Accompanying Measure), destiné à jeter les bases d'une infrastructure logicielle d'usage général en robotique basée sur des logiciels libres et/ou ouverts. D. Simon a participé à deux journées de travail et de démonstration à Leuven (Belgique) en novembre.

<sup>7</sup>ARTIST : <http://www.systemes-critiques.org/ARTIST>

- Le projet BIP a des contacts avec le réseau européen DEFINE (« Dependability Foundations for Information infrastructures - Network of Excellence »<sup>8</sup>). H. Kalla a participé et fait une présentation au « kick-off meeting » à Pise (Italie) en novembre.

## 9. Diffusion des résultats

### 9.1. Animation de la communauté scientifique

- K. Altisen et E. Rutten ont démarré un groupe de travail sur la synthèse de contrôleurs regroupant pour des séminaires les chercheurs intéressés à grenoble (VERIMAG, LAG, INRIA) et potentiellement en Rhône-Alpes.
- B. Brogliato est Editeur Associé à Automatica depuis Octobre 1999 ; membre du comité international de programme de l'International Conference on Nonsmooth/Nonconvex Mechanics, Greece, 2002 ; membre du comité international de programme de European Control Conference ECC03, Cambridge, septembre 2003 ; réviseur pour Mathematical Reviews (Mécanique des Solides 70EXX, commande des systèmes 93DXX) ; book-reviewer pour ASME Applied Mechanics Reviews ; membre des jurys de thèse de E. Dimnet (LCPC, juillet 2002) et M. Cadivel (IREMIA, université de la Réunion, septembre 2002) ; membre titulaire de la CSES 61 de l'Université Claude Bernard Lyon 1 ; membre élu du governing board de EUCA (European Union of Control Associations) depuis septembre 2001 ; membre de EUROMECH Nonlinear Oscillations Conference Committee (ENOCC) pour la période 2003-2008.
- B. Espiau est du comité de programme de IEEE Conf. on Robotics and Automation et de CLAWAR.
- A. Girault est membre des comités d'organisation et de programme de *SLAP'02 : Synchronous Languages, Applications, and Programming* et *SLAP'03* ; membre du comité d'organisation de *ETAPS'02 : European Joint Conferences on Theory and Practice of Software* ; concepteur et animateur du portail web synchrone SYNALP (« SYNchronous Applications, Languages, and Programs »<sup>9</sup>).
- E. Rutten est membre des comités de programme pour *Euromicro Conference on Real-Time Systems, ERTS'02* et *ERTS'03*, *Salon Real-Time Systems, RTS'02* et *RTS'03*, *Congrès MSR'03 (Modélisation des Systèmes Réactifs)* et *Eleventh International Workshop on Parallel and Distributed Real-Time Systems, WPDRTS'03* (satellite de *IPDPS'03*) ; membre des comités d'organisation et de programme de *SLAP'02 : Synchronous Languages, Applications, and Programming* et *SLAP'03* ; membre du *BoD* de la société Euromicro ; membre titulaire de la CS 27 de l'Université de Bretagne Occidentale (Brest) ; membre du jury de thèse de Camille Schnakenbourg (ENS Cachan) ; membre élu de la commission d'évaluation de l'INRIA depuis septembre 2002.
- O. Sename est membre du comité de programme de « l'IFAC Workshop on Time Delay Systems » (INRIA-ROCQUENCOURT, France, septembre 2003).
- O. Sename a co-organisé avec C. Canudas de Wit (LAG) l'école d'été sur le thème « Modélisation et commande de véhicules automobiles », qui s'est tenue à l'ENSIEG en septembre 2002.

En dehors des conférences citées en bibliographie, les chercheurs du projet ont participé ou présenté leurs travaux dans les manifestations suivantes :

- C. Azevedo a donné un séminaire à la réunion du projet Robea en janvier 2002, intitulé « Commande prédictive pour la marche de robots bipèdes ».
- C. Azevedo a donné un séminaire à l'Institut de Neurosciences Physiologiques et Cognitives en février 2002, intitulé « Le contrôle de la locomotion bipède chez le robot ».

<sup>8</sup> DEFINE : <http://www.laas.fr/DeSIREDeFINE/Define.html>

<sup>9</sup> SYNALP : <http://www.synalp.org>

- B. Brogliato organise un mini-cours à l'European Control Conference ECC'03 avec M. Heemels de Eindhoven (TU/e), intitulé « Hybrid Complementarity Systems ».
- A. Girault a donné un exposé invité au séminaire MIM 1 de l'ENS Lyon en janvier 2002.
- A. Girault et E. Rutten ont donné un exposé au 9<sup>e</sup> International Workshop on Synchronous Programming, à Lalonde les Maures (France) en décembre 2002.
- E. Rutten a participé au workshop AIPS'02 « Planning via Model-Checking » (Toulouse, avril 2002) et à EMSOFT'02 (« Embedded Software », Grenoble, octobre 2002).

## 9.2. Enseignement

- C. Azevedo : monitorat en automatique à l'INPG-ENSIEG.
- B. Brogliato : systèmes dissipatifs et commande, 3<sup>e</sup> année de l'INPG-ENSIEG.
- A. Girault et E. Rutten : compilation, en 2<sup>e</sup> année de l'INPG-ENSIMAG.
- A. Girault, E. Rutten et D. Simon : cours de programmation temps-réel et réactive du DEA Automatique de l'INPG.
- O. Sename : cours de commande robuste mono et multivariable à l'ENSIEG et au DEA Automatique de l'INPG.

# 10. Bibliographie

## Bibliographie de référence

- [1] J.-J. BORRELLY, E. C. MANIÈRE, B. ESPIAU, K. KAPELLOS, R. PISSARD-GIBOLLET, D. SIMON, N. TURRO. *The Orccad Architecture*. in « International Journal on Robotic Research », numéro 4, volume 17, 1998, pages 338-359.
- [2] P. CASPI, A. GIRAULT, D. PILAUD. *Automatic Distribution of Reactive Systems for Asynchronous Networks of Processors*. in « IEEE Trans. on Software Engineering », numéro 3, volume 25, mai, 1999, pages 416-427.
- [3] B. ESPIAU, F. CHAUMETTE, P. RIVES. *A New Approach to Visual Servoing in Robotics*. in « IEEE Trans. on Robotics and Automation », numéro 3, volume 8, 1992.
- [4] B. ESPIAU, THE BIP-TEAM. *Bip : a Joint Project for the Development of an Anthropomorphic Biped Robot*. in « Int. Conf. on Advanced Robotics », Monterey, CA, USA, juillet, 1997.
- [5] A. GOSWAMI, B. THUILOT, B. ESPIAU. *Compass-Like Biped Robot Part I : Stability and Bifurcation of Passive Gaits*. Research Report, numéro 2996, Inria, octobre, 1996, <http://www.inria.fr/rrrt/tr-2996.html>.
- [6] C. SAMSON, B. ESPIAU, M. LE BORGNE. *Robot Control : The Task Function Approach*. Oxford Science Publications, 1991.
- [7] D. SIMON, B. ESPIAU, E. CASTILLO, K. KAPELLOS. *Computer-Aided Design of a Generic Robot Controller Handling Reactivity and Real-Time Control Issues*. in « IEEE Trans. on Control Systems Technology », numéro 4, volume 1, décembre, 1993, <http://www.inrialpes.fr/iramr/pub/Orccad>.

## Livres et monographies

- [8] *Workshop on Synchronous Languages, Programming, and Applications*. éditeurs F. MARANINCHI, A. GIRAULT, E. RUTTEN., série ENTCS, volume 65.5, Elsevier Science, Grenoble, France, avril, 2002, <http://www.elsevier.com/gej-ng/31/29/23/117/53/show/Products/notes/index.htm>.

## Thèses et habilitations à diriger des recherche

- [9] C. AZEVEDO. *Contrôle de la locomotion artificielle : de l'homme aux robots*. PhD Thesis, INPG, Grenoble, France, 2002.

## Articles et chapitres de livre

- [10] N. ANDREFF, B. ESPIAU, R. HORAUD. *Visual Servoing from Lines*. in « International Journal on Robotic Research », 2002, à paraître.
- [11] F. BACCELLI, B. GAUJAL, D. SIMON. *Analysis of Preemptive Periodic Real Time Systems Using the (max,plus) Algebra With Applications in Robotics*. in « IEEE Trans. on Control Systems Technology », numéro 3, volume 10, mai, 2002, pages 368-380.
- [12] B. BROGLIATO. *Some Perspectives on the Analysis and Control of Complementarity Systems*. in « IEEE Trans. on Automatic Control », 2003, à paraître.
- [13] B. BROGLIATO, A. T. DAM, L. PAOLI, F. GÉNOT, M. ABADIE. *Numerical Simulation of Finite-Dimensional Multibody Nonsmooth Mechanical Systems*. in « ASME Applied Mechanics Reviews », volume 55, mars, 2002, pages 107-150.
- [14] A. GIRAULT. *Elimination of Redundant Messages with a Two-Pass Static Analysis Algorithm*. in « Parallel Computing », numéro 3, volume 28, mars, 2002, pages 433-453.
- [15] A. GIRAULT. *Automatic Distribution of Synchronous Programs*. in « ERCIM News », volume 52, janvier, 2003, pages 26-27, à paraître.
- [16] R. LEINE, B. BROGLIATO, H. NIJMEIJER. *Bifurcations and Periodic Motion Induced by the Painlevé Paradox*. in « European Journal of Mechanics A/Solids », volume 21, 2002, pages 689-896.
- [17] M. MATA-JIMENEZ, B. BROGLIATO. *Analysis of PD and Nonlinear Control of Mechanical Systems with Dynamic Backlash*. in « Journal of Vibration and Control », 2003, à paraître.

## Communications à des congrès, colloques, etc.

- [18] V. ACARY, B. BROGLIATO. *Concurrent Multiple Impacts Modelling : Case Study of a 3-Ball Chain*. in « 2nd MIT Conference on Computational Fluid and Solid Mechanics », juin, 2003, à paraître.
- [19] N. ANDREFF, B. ESPIAU. *Revisiting Plücker Coordinates in Vision-Based Control*. in « Advances in Robot Kinematics », Caldes de Maravella, Spain, juin, 2002.

- [20] C. AZEVEDO, N. ANDREFF, S. ARIAS, B. ESPIAU. *Experimental Bipedal Walking*. in « Int. Symp. on Experimental Robotics », Ischia, Italy, juillet, 2002.
- [21] C. AZEVEDO, P. POIGNET. *Commande prédictive pour la marche d'un robot bipède sous-actionné*. in « Conférence internationale francophone d'automatique », 2002.
- [22] C. AZEVEDO, P. POIGNET, B. ESPIAU. *Moving Horizon Control for Biped Robots without Reference Trajectory*. in « Int. Conf. on Robotics and Automation », Washington, USA, mai, 2002.
- [23] C. AZEVEDO, P. POIGNET, B. ESPIAU. *Online Optimal Control for Biped Robots*. in « IFAC Conference », Barcelona, Spain, juillet, 2002.
- [24] J.-M. BOURGEOT, N. CISLO, B. ESPIAU. *Path-Planning and Tracking in a 3D Complex Environment for an Anthropomorphic Biped Robot*. in « IROS Conference », Lausanne, Switzerland, septembre, 2002.
- [25] B. BROGLIATO, M. MABROUK, A. ZAVALA-RIO. *A Controllability Criterion for Juggling Mechanical Systems*. in « Contact Mechanics », Kluwer Academic Publishers, pages 75-82, 2002.
- [26] C. C. DE WIT, B. ESPIAU, C. URREA. *Orbital Stabilization of Underactuated Mechanical Systems*. in « IFAC Conference », Barcelona, Spain, juillet, 2002.
- [27] B. ESPIAU. *Anthropomorphic Biped Robots : Technical Challenges and Applicative Impacts*. in « Climbing and Walking Robots Conference, CLAWAR'02 », Paris, France, septembre, 2002.
- [28] A. GIRAULT, C. MÉNIER. *Automatic Production of Globally Asynchronous Locally Synchronous Systems*. in « 2nd International Workshop on Embedded Software, EMSOFT'02 », série LNCS, volume 2491, Springer-Verlag, éditeurs A. SANGIOVANNI-VINCENTELLI, J. SIFAKIS., pages 266-281, Grenoble, France, octobre, 2002.
- [29] F. LYDOIRE, P. POIGNET, C. AZEVEDO, B. ESPIAU. *3D Parametrized Gaits for Biped Walking*. in « Climbing and Walking Robots Conference, CLAWAR'02 », Paris, France, septembre, 2002.
- [30] H. MARCHAND, E. RUTTEN. *A Case Study in Discrete Control Synthesis for Excavator Operation*. in « Proceedings of the IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics, SMC'02 », Hammamet, Tunisia, octobre, 2002.
- [31] H. MARCHAND, E. RUTTEN. *Managing Multi-Mode Tasks with Time Cost and Quality Levels Using Optimal Discrete Control Synthesis*. in « Proceedings of the 14th Euromicro Conference on Real-Time Systems, ECRTS'02 », pages 241-248, Vienna, Austria, juin, 2002.

## Rapports de recherche et publications internes

- [32] V. ACARY, B. BROGLIATO. *Coefficients de Restitution et Efforts aux Impacts ; Estimation Analytique*. rapport technique, Schneider Electric, 2002.

- [33] Y. HURMUZLU, F. GÉNOT, B. BROGLIATO. *Modelling, Stability and Control of Biped Robots - A General Framework*. rapport technique, numéro 4290, INRIA, 2002, <http://www.inria.fr/rrrt/rr-4290.html>.
- [34] E. RUTTEN, H. MARCHAND. *Task-Level Programming for Control Systems Using Discrete Control Synthesis*. rapport de recherche, numéro 4389, INRIA, février, 2002, <http://www.inria.fr/rrrt/rr-4389.html>.
- [35] D. SIMON, F. BENATTAR. *Design of Real-Time Periodic Control Systems Through Synchronisation and Fixed Priorities*. rapport technique, numéro 4677, Inria, décembre, 2002, <http://www.inria.fr/rrrt/rr-4677.html>.

## Divers

- [36] A. BINDAL. *A Local Algorithm for Finding the Disjoint Paths in a Network of Processors*. rapport technique, ITT Delhi, Delhi, India, juin, 2002.
- [37] A. CLODIC. *Tâches multi-modes et génération automatique de contrôleurs*. Rapport de DEA IVR (Image, Vision, Robotique), INPG, juin, 2002.
- [38] F. GIRAUD. *Répartition automatique de programmes Esterel*. rapport technique, Isima, Clermont-Ferrand, France, septembre, 2002.
- [39] T. NEVEU. *Étude d'un système microélectronique pour la génération automatique de contrôleur*. Rapport de DEA Micro-électronique, ISTG, septembre, 2002.
- [40] E. RUTTEN, A. GIRAULT, H. MARCHAND. *Un panorama des techniques de la programmation synchrone pour le flot de conception de ST Microelectronics*. janvier, 2002, Rapport de contrat ST Microelectronics n° 1 01 G070700 71299 21 2..
- [41] F. SALPÉTRIER. *Interface graphique utilisateur pour la répartition de programmes Lustre dirigée par les horloges*. rapport technique, Esisar, Valence, France, juin, 2002.
- [42] D. SIMON, M. JUVIN. *Choix d'un O.S. temps-réel et d'un processeur*. mars, 2002.
- [43] T.-H. TENG. *Report on Industrial Attachment*. Singapore, juin, 2002.

## Bibliographie générale

- [44] B. BROGLIATO. *On the Control of Non-Smooth Complementarity Dynamical Systems*. in « Phil. Trans. R. Soc. Lond. A », numéro 1789, volume 359, 2001, pages 2369-2384.
- [45] J. EKER, P. HAGANDER, K.-E. ÅRZÉN. *A Feedback Scheduler for Real-Time Controller Tasks*. in « Control Engineering Practice », numéro 12, volume 8, 2000, pages 1369-1378, <http://www.control.lth.se/~anton/artes>.
- [46] A. GIRAULT, C. LAVARARENNE, M. SIGHIREAU, Y. SOREL. *Fault-Tolerant Static Scheduling for Real-Time Distributed Embedded Systems*. rapport technique, numéro 4006, Inria, septembre, 2000, <http://www.inria.fr/rrrt/rr-4006.html>.

- [47] A. GOSWANI, B. THUÏLOT, B. ESPIAU. *A Study of the Passive Gait of a Compass-like Biped Robot : Symmetry and Chaos*. in « International Journal on Robotic Research », numéro 12, volume 17, décembre, 1998.
- [48] K. HASHIMOTO, T. TSUCHIYA, T. KIKUNO. *Effective Scheduling of Duplicated Tasks for Fault-Tolerance in Multiprocessor Systems*. in « IEICE Transactions on Information and Systems », numéro 3, volume E85-D, mars, 2002, pages 525-534.
- [49] C. LU, J. STANKOVIC, T. ABDELZAHER, G. TAO, S. SON, M. MARLEY. *Performance Specifications and Metrics for Adaptive Real-Time Systems*. in « Real-Time Systems Symposium », décembre, 2000, <http://www.cs.virginia.edu/~stankovic/rts.html>.
- [50] P. RAMADGE, W. WONHAM. *Supervisory control of a class of discrete event processes*. in « SIAM J. of Control and Optimization », volume 25, janvier, 1987, pages 206-223.
- [51] D. SIMON, K. KAPELLOS, B. ESPIAU. *Formalization of hybrid structures in robot controllers : the Orccad approach*. in « 9<sup>th</sup> Symposium on information control in manufacturing, INCOM'98 », IFAC, Nancy, France, juin, 1998.
- [52] C. VAUGHAN, B. DAVIS, J. O'CONNOR. *Dynamics of Human Gait*. Human Kinetic, 1992.
- [53] B. WAXMAN. *Routing of Multipoint Connections*. in « IEEE J. on Selected Areas in Communications », numéro 9, volume 6, décembre, 1988, pages 1617-1622.
- [54] D. WINTER. *Biomechanics and Motor Control of Human Movement*. Wiley-Interscience, 1990.