

## Chapitre 7

# Projet Sports

### Mots-clés

Systèmes réactifs, systèmes temps réel, programmation synchrone, modélisation, vérification, évaluation de performances.

## 7.1 COMPOSITION DE L'ÉQUIPE

		Arrivée	Départ
<i>Responsable du projet</i>			
Charles ANDRÉ	Professeur		
<i>Assistante du projet</i>			
Viviane ROSELLO			
<i>Membres permanents</i>			
Charles ANDRÉ	Professeur		
Fernand BOÉRI	Professeur		déc 01
	Professeur émérite		
Daniel GAFFÉ	Maître de conférences		
Marie-Agnès PERALDI-FRATI	Maître de conférences		
Jean-Paul RIGault	Professeur		
<i>Membres non permanents</i>			
Lionel BLANC	Doctorant		oct 99
Frédéric MALLEt	Doctorant		déc 00
	ATER		oct 01

## 7.2 PRÉSENTATION GÉNÉRALE ET OBJECTIFS SCIENTIFIQUES

### Systèmes étudiés

Le projet SPORTS (Synchronous Programming Of Real-Time Systems) a été créé en 1993. Il s'intéresse à la *conception de systèmes réactifs sûrs*. L'objectif est de définir des modèles, méthodes et outils, permettant la conception d'applications à *contrôle prépondérant*. Cette classe d'applications est dite *réactive* car elle se caractérise par sa *sensibilité* aux événements de l'environnement et sa faculté de modifier son compor-

tement en conséquence. Les applications sont également soumises à des contraintes dites « temps réel » et doivent satisfaire des propriétés non fonctionnelles (temps de réponse, prévisibilité de comportements, sûreté de fonctionnement ...).

Les applications étudiées relèvent de domaines variés comme les architectures de processeurs numériques, les automatismes et les systèmes embarqués

tels que ceux qu'on trouve dans le domaine automobile.

## Modèles

Les modèles adoptés dans le projet SPORTS sont des modèles à *événements discrets*. Ils sont choisis (empruntés ou créés) pour leur capacité à exprimer les *comportements attendus* et les *propriétés* des systèmes réactifs. Ils doivent également offrir des possibilités d'*analyse*, de *vérification* et d'*évaluation de performances*.

### Modèles synchrones

Une première réponse au choix de modèles a été apportée par les langages synchrones et en particulier par le langage ESTEREL. La sémantique des langages synchrones étant définie en termes mathématiques, les programmes synchrones se prêtent bien à des traitements formels. Avec ces langages, compilation, optimisation et analyse sont intimement liées. Le projet SPORTS a contribué aux recherches dans le domaine synchrone en définissant des modèles (SYNCCHARTS, S-GRAFCET) qui s'appuient sur les mêmes fondements théoriques que les langages synchrones et se distinguent par leur syntaxe graphique et des domaines d'application plus ciblés.

### Modèles objet

Une deuxième évolution a influencé l'orientation scientifique de SPORTS : l'informatisation très rapide des systèmes dits *embarqués*, ou tout au moins des systèmes dans lesquels des processeurs numériques se trouvent « enfouis »<sup>1</sup>. La programmation des systèmes embarqués utilise maintenant des modèles de programmation adaptés à leur complexité croissante. Ainsi, dans le domaine des systèmes de contrôle, les approches par objets et composants, initiées par la méthode ROOM, tendent à remplacer l'approche fonctionnelle qui a longtemps prévalu.

SPORTS utilise maintenant des modèles exploitant les *concepts objet* :

- le modèle utilisé dans SEP [2] pour décrire des

architectures numériques et évaluer leurs performances ;

- un modèle objet dans lequel les comportements peuvent être exprimés de façon synchrone [11].

Ces modèles nous ont rapprochés d'UML (Unified Modeling Language). UML est présenté<sup>2</sup> comme « un langage de modélisation visuel d'usage général utilisé pour spécifier, visualiser, construire et documenter les constituants d'un système logiciel ». Son objectif est de faciliter la compréhension, l'analyse, la conception et la maintenance des systèmes. Il peut être utilisé dans les différentes étapes du cycle de vie du système. Il décrit des aspects statiques, dynamiques, environnementaux et organisationnels. Il définit des notations et leur donne une sémantique (souvent informelle). Sur bien des points, ces possibilités rejoignent nos préoccupations, toutefois leur application aux systèmes embarqués pose des questions non résolues. La définition de « profil » UML temps réel est un sujet d'actualité. Un des objectifs du projet SPORTS est de proposer un « profil » UML adapté au synchrone. Les recherches sur ce thème portent sur la création de modèles spécifiques et leur sémantique.

## Outils et applications

Pour mettre en œuvre les modèles créés dans SPORTS, des outils (prototypes) ont été développés (SYNCCHARTS, S-GRAFCET, SEP). Les SYNCCHARTS ont même été repris et intégrés dans la plate-forme Esterel-Studio de la société Esterel-Technologies.

Ces applications traitent pour l'essentiel de systèmes temps réel embarqués, souvent critiques. Cependant les vertus sémantiques du modèle synchrone nous ont permis d'envisager de dépasser ce cadre initial, par exemple en abordant des problèmes de pur génie logiciel (voir 7.3). Grâce à ces outils des applications variées ont pu être développées. De ces expériences, nous espérons dégager des lignes de conduite pour exploiter au mieux les approches synchrone et objet.

## 7.3 RÉSULTATS SCIENTIFIQUES

### Modélisation et sémantique

#### SYNCCHARTS

Les SYNCCHARTS sont un modèle graphique synchrone, pleinement compatible avec le langage ESTEREL. Les SYNCCHARTS ont été retenus comme un des formalismes d'entrée du produit logiciel commercial Esterel-Studio. La première distribution (prototype universitaire des SYNCCHARTS) date de 1997.

Les SYNCCHARTS ont été présentés dans le précé-

dent rapport scientifique. Le modèle n'a pas été modifié, l'activité de recherche a plutôt porté sur la *diffusion du modèle* par des *communications* illustrant les possibilités de modélisation et d'analyse des SYNCCHARTS :

- modélisation d'un régulateur de vitesse automobile [5] ;
- prototypage rapide d'un système de surveillance autoroutier [14] ;
- spécification et validation d'un encodeur de flot binaire [10] ;

1. Pour simplifier, dans la suite l'expression « systèmes embarqués » désigne aussi bien les systèmes embarqués proprement dits, que les systèmes informatiques enfouis.

2. « The Unified Modeling Language Reference Manual », J. Rumbaugh, I. Jacobson, G. Booch, Addison-Wesley (1999)

- utilisation d'un modèle dérivé des SYNCCHARTS pour exprimer les contraintes comportementales d'utilisation de composants dans un framework [20] (en collaboration avec le projet RAINBOW).

D'autres communications portent sur les *problèmes sémantiques* liés aux SYNCCHARTS et plus généralement au synchrone :

- l'article « Synchronous Programming: Properties within a Reaction » [4] explique la notion d'ordre d'exécution des actions dans un instant et montre comment exploiter le compilateur ESTEREL pour s'assurer qu'un ordre partiel donné est bien respecté lors des réactions ;
- la communication invitée à la conférence *System, Man, and Cybernetics 2002* [13], intitulée « Variations on the Semantics of Graphical Models for Reactive Systems » explique comment relâcher certaines contraintes sur les SYNCCHARTS, tout en conservant une sémantique rigoureuse. L'objectif est de pouvoir définir des modèles plus simples que les SYNCCHARTS mais suffisamment expressifs pour une classe d'applications.

### SIB

Le modèle SIB (Synchronous Interface Behavior) [12] est un formalisme graphique de représentation des comportements d'entrée-sortie et des interactions inter-objets. Ce modèle est proposé comme un substitut aux *diagrammes de séquences* d'UML. Il est en fait proche des MSC (Message Sequence Charts) et des LSC (Live Sequence Charts) avec des possibilités supplémentaires pour exprimer des concepts synchrones. Comme les LSC, les SIB permettent également l'expression de propriétés comportementales existentielles (existence d'une histoire satisfaisant une propriété), universelles (propriétés invariantes) ou mixtes (propriétés invariantes après un transitoire).

Les SIB ont été créés dans la continuité des SYNCCHARTS. Ils ont une sémantique mathématique compatible avec celle d'ESTEREL, ce qui permet leur traduction automatique en ESTEREL. Étant utilisés en spécification, les SIB supportent une forme d'indéterminisme, ce résultat est obtenu par une instrumentation de code transparente à l'utilisateur [37].

### SEP

La technologie actuelle de fabrication de circuits intégrés (Deep-Sub Micron Technology) permet l'intégration d'un système complet sur un seul et même composant (System-On-a-Chip, SOC). Ces systèmes sont complexes. *Réutiliser* l'existant (modèles, outils, sous-systèmes) devient alors incontournable pour être en mesure de les concevoir dans les délais imposés par le marché. Cependant, la réutilisation a un coût important. Le temps de conception d'un modèle réutilisable est généralement plus grand et la généralité de ces modèles se fait en général aux dépens des performances.

Le projet SEP s'intéresse à la modélisation de SOC et élabore une méthode d'assistance à la conception de modèles réutilisables. La taille importante des systèmes considérés ne permettant pas, à ce jour, la preuve formelle du système complet, la simulation est une alternative intéressante. SEP est basé sur l'utilisation intensive de techniques orientées objets et utilise les paradigmes objets pour proposer des modèles de simulation réutilisables et des règles de compositions qui permettent l'interopérabilité et l'assemblage. Ces travaux ont été développés par Frédéric MALLET et décrits dans sa thèse [2]. Ils trouvent actuellement un prolongement à l'Université d'Edimbourg, où il est assistant de recherche. Il s'agit de modéliser l'architecture QCDOC (Quantum ChromoDynamics On a Chip).

### Grafcet et les formalismes synchrones

Pour offrir à la communauté Grafcet, les outils et méthodes spécifiques au synchrone, tout en conservant le formalisme Grafcet bien intégré dans le milieu industriel, SPORTS avait défini dès 1996 un nouveau modèle synchrone: le S-GRFCET. A cette époque, la compilation directe en machine de Mealy imposait une énumération explicite de tous les états accessibles. En 1999, cette limitation a été levée et un nouvel algorithme (PFI symbolique) a été mis au point pour identifier symboliquement les points fixes d'une *partition de sous-espaces d'états*.

Parallèlement, d'autres études ont été faites dans SPORTS pour donner des règles de réécriture de S-GRFCET vers des modèles d'entrée de synthétiseurs comme VHDL [18].

### Systèmes synchrones et répartition

Les systèmes temps réel sont généralement distribués. Cette distribution est souvent imposée par le matériel, elle est parfois rendue nécessaire pour des raisons de fiabilité, tolérance aux pannes et évolutivité. Les systèmes sont conçus comme des modules communicants. Dans le cas des systèmes de contrôle, les supports de communication sont des réseaux locaux temps réel. Ils sont présents dans de nombreux domaines de l'industrie manufacturière (FIP, Profibus), automobile (CAN, VAN) et du bâtiment (Bati-bus). Ces réseaux ont comme caractéristique première d'être déterministes sur leur temps de transmission. Nos travaux ont porté sur la modélisation de ces réseaux à des fins d'évaluation de performance ainsi que sur la mise en œuvre de méthodes de répartition d'applications synchrones sur ces réseaux. Ces travaux se sont concrétisés par la thèse de Lionel BLANC [1] qui se base sur l'approche synchrone pour modéliser et vérifier symboliquement des caractéristiques temporelles et comportementales de l'application répartie. Ces travaux ont également conduit à la définition d'une plate-forme de conception d'applications distribuées sur le réseau CAN appelée R-PORTS [25].

## Outils pour le développement des systèmes réactifs

### SYNCCHARTS

Le modèle n'a connu que des évolutions de détail et des améliorations ponctuelles. La dernière en date est la possibilité d'engendrer une description XML de la structure, facilitant ainsi l'utilisation des SYNCCHARTS par d'autres logiciels. Les outils relatifs aux SYNCCHARTS sont disponibles sur le web.<sup>3</sup>

### S-GRAF CET

Le nouvel algorithme (PFI symbolique) a été implémenté dans le compilateur G2SC (Grafcet to SC) qui engendre maintenant l'automate implicite. Pour ce compilateur disponible sur le web<sup>4</sup>, un effort a également été porté sur la génération : en plus du code intermédiaire SC, l'outil peut aussi engendrer du code ESTEREL, LUSTRE, BLIF, C et VHDL [18].

### SEP

Associé à la méthode SEP, un outil a été développé : il propose une bibliothèque de composants standards qui contient les composants classiques de description d'architectures matérielles (registres, ALU, mémoire). SEP propose également des composants adaptés à la description du jeu d'instructions, ainsi que des composants facilitant l'interaction avec des modèles synchrones.

Une technique utilisant l'information sur le type des données manipulées permet d'effectuer une simulation symbolique et ainsi réduire le nombre de jeux de tests nécessaires à la validation des modèles.

### Plate-forme multi-formalismes synchrones

La programmation des systèmes réactifs peut être facilitée par la mise en œuvre concurrente de formalismes et langages différents (style déclaratif-impératif, forme textuelle-graphique). Les SYNCCHARTS apportent une réponse partielle car ils allient les avantages d'ESTEREL, GRAFCET et des Statecharts. Dans un *but essentiellement pédagogique*, SPORTS a développé une plate-forme logicielle commune qui permet d'exprimer chaque comportement local dans le formalisme synchrone le plus adapté et qui intègre également un modèle comportemental de l'environnement [23].

## Applications validantes

### Exemple de machine d'exécution : Le grand Équatorial Coudé

L'approche synchrone et le concept de *machine d'exécution* ont été mis à profit sur une application originale : le grand Équatorial Coudé de l'observatoire de Nice Côte d'Azur (O.C.A.). Cette lunette astronomique de trois étages et d'une masse de trois tonnes

voit son inertie mécanique encore augmentée par la géométrie de l'instrument (deux bras de leviers de quatre mètres, portant chacun une masse de 700 kg!).

Le système de commande de cet instrument a été repensé avec une approche synchrone. Le pouvoir d'expression d'ESTEREL puis des SYNCCHARTS a permis d'identifier des erreurs de conceptions sur le contrôle d'origine susceptibles de nuire à l'intégrité mécanique de la lunette [39, 40]. La solution choisie met en œuvre une machine d'exécution robuste en temps réel sous RT-Linux. Les détails techniques sont accessibles sur le web<sup>5</sup>.

### Applications modélisées en SEP

Les applications modélisées à ce jour sont des processeurs de traitement du signal (Pine, OAK), des processeurs RISC (ARM7TDMI, ARM9), un système de contrôle d'arrosage automatique (pour démontrer l'intégration d'un modèle décrit en ESTEREL), un système de cache, un ASIC composé d'un DSP et d'un ARM7. L'étude de ces applications est à l'origine d'un dépôt de brevet (voir paragraphe 7.4).

### Application du modèle synchrone au génie logiciel : composants et frameworks

Avec l'émergence de la programmation par composants, il est devenu indispensable de fournir des outils d'assistance et de validation permettant l'utilisation sûre desdits composants (par assemblage ou par extension). Pour cela il convient de décrire le comportement externe du composant, sous forme d'un *protocole* indiquant les séquences valides d'appel d'opérations ainsi que les relations comportementales que le composant entretient avec d'autres. Le modèle synchrone se prête bien à une telle description et permet des preuves formelles de composition ou de substituableté.

L'utilisation d'une notation dérivée des SYNCCHARTS a été proposée pour modéliser ces protocoles de composants [40] afin de vérifier formellement leur composition et constitue une des deux grandes parties de la thèse de Pascal RAPICAULT [8]. Cette étude s'effectue en liaison avec le projet RAINBOW et la société OTI (filiale d'IBM).

En utilisant d'autres techniques de représentation d'automates, mais toujours dans le cadre du paradigme synchrone, un travail mené en commun avec le projet ORION et l'action TICK de l'INRIA Sophia Antipolis a conduit à une modélisation comportementale d'un framework avec la possibilité de vérifier formellement l'extension de composants (par dérivation de classes ou sous-typage) [6].

Noter que ces approches se font dans le cadre d'UML et de ses méta-modèles [20] ; elles complètent et justifient le besoin d'un profil synchrone intégré à UML.

3. <http://www.i3s.unice.fr/sports/SyncCharts/>

4. <http://www-mips.unice.fr/~gaffe/tools.html>

5. <http://www-mips.unice.fr/~gaffe/coude/doc.pdf>



## 7.4 ACTIONS DE VALORISATION

### ► Brevet

Une des grandes difficultés pour la définition d'un modèle de simulation de microprocesseurs est la modélisation du jeu d'instructions. En partenariat avec Philips-VLSI Technology nous avons breveté un modèle générique de décodeur d'instructions [44]. Ce mécanisme permet de collecter les services proposés par les unités de calcul du modèle afin de définir de nouvelles instructions et générer un décodeur d'instruction adapté. Il permet d'exploiter de façon optimale le parallélisme d'un processeur et de simuler des instructions pseudo-assembleur sans passer par une traduction en langage machine.

### ► Journées SEE

La SEE (Société de l'Électricité, de l'Électronique, et des Technologies de l'Information et de la Communication<sup>6</sup>) comprend plusieurs « clubs ». Le club 63<sup>7</sup>, intitulé « Systèmes informatiques de confiance » organise des journées de travail autour du thème « Objectif zéro défaut ». Le but de ces journées est d'étudier, de

promouvoir et d'évaluer l'utilisation de méthodes et techniques formelles dans le développement de systèmes à logiciels prépondérants et nécessitant un haut degré de confiance. Dans ce cadre, les membres de SPORTS ont présenté trois exposés [29, 30, 32] portant sur nos modèles synchrones et les possibilités de couplage avec UML.

### ► Syntel, Synchrone pour les télécommunications

C'est un projet RNRT. SPORTS a été sous-traitant pour les liaisons modèles synchrones et orientés objets, présentés dans le paragraphe 7.3.

### ► Action coopérative INRIA

Il s'agit d'une coopération entre le projet SPORTS et l'action TICK de l'INRIA, portant sur une application proposée par le projet ICARE de l'INRIA. L'action MURE (Méthodes Unifiées pour le Réactif Embarqué) est une approche méthodologique d'une application de contrôle répartie sur le SyCab (robot mobile) et mettant en œuvre un réseau de terrain CAN (paragraphe 7.3).

## 7.5 COLLABORATIONS NATIONALES ET INTERNATIONALES

- INRIA Sophia Antipolis, action TICK: il s'agit d'une forme de collaboration avancée, qui devrait conduire à une fusion (voir dans les perspectives). La coopération se traduit par des séminaires réguliers communs, des actions de recherche communes (action MURE), des recherches et publications en commun [22, 4].
- INRIA Rocquencourt, projet OSTRE (Optimisation des Systèmes Temps Réel Embarqués): sur les aspects systèmes embarqués et plus particulièrement les applications automobiles.
- INRIA Alpes et laboratoire d'informatique de Supélec, sur les problèmes de machines d'exécution de programmes synchrones [8].
- LORIA Nancy, équipe TRIO (Temps Réel et InterOpérabilité) et IRCCYN Nantes, équipe Systèmes Temps Réel. SPORTS a participé avec ces équipes au projet COVADIS et maintenant au projet EAST-EEA.
- Université d'Edimbourg, projet HASE (Hierarchical Computer Architecture Design)

## 7.6 ACTIVITÉS D'ADMINISTRATION DE LA RECHERCHE ET ANIMATION SCIENTIFIQUE

### Comités, expertises

#### ► Charles ANDRÉ

- Co-président du comité de programme de ET-FA'2001 (Emerging Technologies and Factory Automation), 15-18 octobre 2001 à Juan les Pins, France.
- Rapporteur extérieur pour l'INSA Lyon (évaluation scientifique des laboratoires L3I (Laboratoire d'Ingénierie de l'Informatique Industrielle) et CITI (Centre d'Innovation en Télécommunications & Intégration de Services), juillet 2001; expertise BQR juin 2002.

- Membre des comités de programme WOODS 2002, RTS, MSR.

#### ► Frédéric MALLET

Président de session, ESM 2002, session « Verification, Validation & Accreditation », 15-17 juin 2002, Darmstadt, Allemagne.

#### ► Jean-Paul RIGAUULT

- Co-président du comité d'organisation d'ECOOP 2000 (14<sup>th</sup> European Conference on Object-

6. <http://www.see.asso.fr>

7. <http://www.supelec-rennes.fr/sic>

Oriented Programming), juin 2000, Cannes, France.

- Membre extérieur du jury de recrutement de CR2 de l'INRIA Sophia Antipolis en juin 2001.
- Membre du comité de normalisation ISO pour le langage C++ (1997-2000), membre du groupe des experts C++ de l'AFNOR.

### Responsabilités au sein de l'Université, liées à la recherche

#### ► Charles ANDRÉ

Direction de l'École Doctorale STIC depuis septembre 2000.

#### ► Jean-Paul RIGAULT

- Président de la Commission de Spécialistes de 27<sup>e</sup> section (informatique) depuis mars 2002.
- Membre du conseil scientifique de l'Université.
- Chargé de Mission pour la mise en place du Campus STIC.

### Participations aux Actions Spécifiques, GDR et projets européens

L'objectif des participations aux actions décrites ci-dessous est de trouver des champs d'application nouveaux, d'induire éventuellement des évolutions sur nos modèles et outils, et d'établir des collaborations avec des équipes extérieures.

#### ► Actions Spécifiques

Nous participons aux journées de travail de deux *Actions Spécifiques* du CNRS ([http://www.cnrs.fr/STIC/html/action/actions\\_du\\_departement-AS.htm](http://www.cnrs.fr/STIC/html/action/actions_du_departement-AS.htm)):

- l'AS n°21 (<http://www.infres.enst.fr/as21>): Sécurité dans les réseaux (Animateur: M. RIGUIDEL)
- l'AS n°55 (<http://www.comelec.enst.fr/as55>): Méthodes formelles de vérification des SOC (Animateurs: R. PACALET, D. BORRIONE).

Ce que nous pouvons apporter à ces groupes de travail, c'est notre expérience dans la modélisation, l'analyse et la réalisation de systèmes réactifs.

#### ► Projet ITEA : EAST-EEA

Ce projet européen, qui implique les constructeurs automobiles (français et allemands, principalement), les équipementiers et des universitaires, traite de *l'architecture électronique embarquée*. Avec l'INRIA (projets OSTRE et TICK), SPORTS participe au groupe de travail n°3 du projet. L'objectif du groupe est en particulier de définir un langage de description pour les modèles architecturaux et de converger vers un « profil » UML adapté au domaine automobile. Le rôle des partenaires académiques est de faire le lien entre les propositions (et réalités) industrielles et l'état de l'art en recherche. Les aspects comportementaux, architecture logicielle, composants, profil UML concernent SPORTS au premier chef.

#### ► Groupe de travail COSED

L'équipe SPORTS participe régulièrement au groupe de travail COSED (Commande Opérationnelle des Systèmes à Événements Discrets) du GDR Automatique. Ce groupe s'intéresse aux langages, outils, méthodes, utilisés pour les phases de conception détaillée (modélisation, simulation, preuves formelles) et d'implantation de la commande. Dans ce cadre, SPORTS intervient sur les aspects « modèles » et « preuves formelles de comportement » en participant et en présentant ses résultats relatifs au GRAFCET et aux SYNCCHARTS [31].

#### ► Séminaire Synchrone

La communauté synchrone organise chaque année, au niveau européen, une semaine de séminaire de recherche. Les équipes participantes sont essentiellement européennes, mais on compte aussi des équipes américaines et indiennes. Ce séminaire est l'occasion de découvrir de nouveaux travaux, de lancer de nouvelles collaborations, etc. Le caractère informel des exposés et des contacts facilite grandement la spontanéité et la réactivité scientifique des chercheurs.

## 7.7 RESPONSABILITÉS D'ENSEIGNEMENTS

Tous les membres permanents du projet SPORTS sont enseignants-chercheurs et effectuent un service statutaire complet dans différentes UFR. Ils ont chacun la responsabilité pédagogique de modules d'en-

seignement spécialisés (architectures matérielles et logicielles, programmation avancée).

Jean-Paul RIGAULT a exercé les fonctions de Directeur de l'ESSI de décembre 1994 à décembre 1999.

## 7.8 PERSPECTIVES D'ÉVOLUTION

### Projet de fusion avec un projet INRIA

Le projet SPORTS de l'I3S à l'intention de poursuivre ses recherches au sein d'un projet commun I3S-

INRIA qui regrouperait SPORTS et l'action TICK (Responsable: Robert DE SIMONE, directeur de recherche à INRIA).

Plusieurs raisons militent en faveur de cette fusion :

► **Une collaboration de plusieurs années et une culture synchrone commune**

Le langage ESTEREL a longtemps été étudié et développé dans un projet commun CMA (Centre de Mathématiques Appliquées de l'École des Mines) et INRIA (projet MEIJE, projet dont est issu TICK). La proximité géographique avec le projet MEIJE a facilité l'accès à toute la plate-forme développée pour ESTEREL pour des chercheurs I3S (dont Charles ANDRÉ).

Le projet SPORTS de l'I3S est né en 1993 avec les premières contributions de l'I3S dans le domaine synchrone (travaux de Marie-Agnès PERALDI sur l'implantation de programmes ESTEREL sur micro-contrôleur). Le projet SPORTS a ensuite trouvé une voie originale dans l'exportation des sémantiques synchrones vers des modèles comme le GRAFCET qui étaient largement utilisés dans le monde des automatismes industriels, mais qui souffraient d'une sémantique par trop informelle (travaux de Daniel GAFFÉ). Les SYNCCHARTS, en 1997, ont constitué un nouveau pas avec la définition d'un modèle synchrone graphique (Charles ANDRÉ).

Au cours des années 90, les projets MEIJE et SPORTS ont participé en commun à des contrats CNET sur *les machines d'exécution pour programmes synchrones* et à un contrat Schneider sur *l'introduction d'aspects formels dans la conception des automatismes industriels*.

À côté de ces collaborations contractuelles, Charles ANDRÉ a été officiellement collaborateur extérieur du projet MEIJE puis de l'action TICK. Signalons également que Jean-Paul RIGAULT faisait partie de l'équipe de l'École des Mines de Paris qui a donné naissance au langage ESTEREL avec Gérard BERRY et Jean-Paul MARMORAT, dans les années 80.

► **La complémentarité des recherches et des compétences**

L'action TICK apporte ses compétences en sémantique synchrone, vérification automatique (model-checking), analyse de programme et optimisation de code. Le projet SPORTS apporte son expérience en applications de contrôle, en réalisation de machines d'exécution, en création de modèles graphiques et outils associés, en modélisation et évaluation de performances d'architectures numériques et en génie logiciel (objets, composants, méta-modélisation).

► **L'opportunité d'un recrutement nouveau**

À la rentrée universitaire 2002, Laurence PIERRE, recrutée comme professeur à l'Université de Nice-Sophia Antipolis, intégrera le projet SPORTS. Elle a passé l'année universitaire 2001-2002 en délégation à l'INRIA, dans l'action TICK. Ses recherches portent sur la vérification et la mécanisation des preuves dans le domaine des circuits et des programmes VHDL. Elle

est membre actif de la communauté CHARME (Correct HARDware design and verification METHODS).

Ses compétences en « theorem proving » complètent celles de « model-checking » développées dans TICK et largement utilisées dans SPORTS.

## Les axes de recherche

### Objectifs à court terme

Il s'agit essentiellement de prolonger des activités en cours dans SPORTS :

► **La compilation circuit des SYNCCHARTS**

La solution actuelle qui consiste à traduire structurellement un SYNCCHARTS en programme ESTEREL n'est pas pleinement satisfaisante car les primitives retenues pour ESTEREL ne sont pas forcément les mieux adaptées pour les SYNCCHARTS. Il est donc envisagé de faire une traduction spécifique directe des SYNCCHARTS en circuits. Le fait que le compilateur ESTEREL soit devenu un produit commercial nous incite également à une plus grande indépendance vis à vis de ce dernier.

► **Le modèle SIB**

Il faut converger vers une notation adéquate et une intégration des SIBs dans UML. Ceci est indispensable à la définition, à moyen terme, d'un profil UML synchrone (voir plus loin).

### Objectifs SPORTS-TICK

Nous nous plaçons ici résolument dans la perspective de la fusion des projets. Certains thèmes apparaissent comme nouveaux dans les recherches de SPORTS, ils étaient présents dans TICK et concernaient SPORTS au moins au niveau de leur utilisation.

► **L'approche par composants**

Afin de réduire le temps de conception des systèmes complexes, l'approche par *composants* se généralise. Les systèmes réactifs ne devraient pas échapper à cette évolution. Ceci est d'autant plus vrai pour les systèmes embarqués, dans lesquels la notion de composant est souvent associée à une réalité physique. Si UML peut être retenu comme un cadre général pour décrire les diverses vues des composants, les relations entre ces vues restent souvent imprécises. L'approche synchrone nous a apporté des sémantiques précises. En donnant aux composants des caractéristiques synchrones, les diverses vues pourraient être formellement corrélées. C'est dans ce sens que nous voudrions introduire les SYNCCHARTS et les SIB dans l'UML, ou tout au moins dans un « profil » UML synchrone.

► **L'analyse statique**

La compilation efficace des systèmes réactifs est une nécessité. Il existe des techniques d'optimisation au niveau des traductions en circuits et en au-

tomates. Des techniques d'optimisation manquent à plus haut niveau de représentation en particulier par une meilleure prise en compte de la hiérarchie des programmes.

Ces techniques feront appel à des méthodes d'analyse statique actuellement étudiées dans le cadre de l'action TICK pour ESTEREL et qu'il faudra étendre aux SYNCCHARTS.

### ► Vérification formelle

Les systèmes que nous considérons, bien qu'orientés contrôle, peuvent également présenter une partie chemin de données. Ils comportent donc une composante état symbolique d'une part, et d'autre part de la mémorisation et des transformations de données. Dans ce contexte, le développement de méthodes de preuve formelle, où *model-checking* et *theorem proving* collaborent, suscite actuellement un vif intérêt. Une partie de nos recherches va s'orienter dans cette direction, l'idée étant de tirer profit des avantages des deux approches, en accélérant les traitements par des techniques algorithmiques autant que possible, et en n'ayant recours à un outil de démonstration de théorèmes que pour les étapes nécessitant un raisonnement déductif (e.g. validation de propriétés arithmétiques).

### ► La distribution de code

Répartir du code synchrone est un problème difficile. Des solutions existent sur des représentations « plates » et au prix d'une duplication importante de code. Notre objectif est d'exploiter la hiérarchie de modes, qui ne sont pas nécessairement tous actifs au même instant. Il s'agit de trouver des protocoles pour déterminer l'absence d'un signal ou la terminaison distribuée d'un instant, en ne faisant dialoguer que les composants réellement actifs. Ces travaux devraient faire l'objet d'une collaboration avec OSTRE pour une réalisation en SYNDEX et être adaptés aux réseaux temps réel (CAN, VAN, ...).

Une extension au problème de co-design peut être abordée dans le prolongement du projet SEP. Une collaboration avec le projet MOSARTS de l'I3S est tout à fait envisageable.

### ► Vers une méthodologie aux travers des applications

A terme, nous cherchons à établir une véritable méthodologie de développement des systèmes à contrôle dominant, intégrant à la fois des aspects synchrones et asynchrones, bien entendu basée sur UML. Les applications considérées seraient issues des projets européens EAST-EEA (automobile) et P2I (Prompt to Implementation, dans le domaine des télécommunications).

## 7.9 BIBLIOGRAPHIE

### Thèses soutenues

- [1] Lionel BLANC. *Répartition de systèmes temps réel à contrôle prédominant*. Thèse de doctorat, Université de Nice-Sophia Antipolis, Octobre 1999.
- [2] Frédéric MALLET. *Modélisation et évaluation de performances d'architectures matérielles numériques*. Thèse de doctorat, Université de Nice-Sophia Antipolis, Décembre 2000.
- [3] Pascal RAPICAULT. *Modèles et techniques pour spécifier, développer et utiliser un framework : une approche par méta-modélisation*. Thèse de doctorat, Université de Nice-Sophia Antipolis, Mai 2002.

### Articles de revues internationales avec comité de lecture

- [4] Charles ANDRÉ et Robert DE SIMONE. Synchronous programming: Properties within a reaction. *JESA*, 36(7):891–903, 2002.
- [5] M. BAYART, E. LEMAIRE, Marie-Agnès PERALDI-FRATI, et Charles ANDRÉ. External and SyncCharts Description of an Automobile Cruise Control. *Control Engineering Practice*, 7:1259 – 1267, 1999.
- [6] Sabine MOISAN, Annie RESSOUCHE, et Jean-Paul RIGAUULT. BLOCKS, a Component Framework with Checking Facilities for Knowledge-Based Systems. *Informatica*, 25(4), 2001. Special Issue on Component Based Software Development.
- [7] Charles ANDRÉ et Hedi BOUFAIED. Execution machine for synchronous languages. Dans *IDPT'2000, Integrated Design and Process Technology*, pages 144–149, Dallas, Texas, USA, Juin 2000. SDPS.
- [8] Charles ANDRÉ, Frédéric BOULANGER, et Alain GIRAULT. Software implementation of synchronous programs. Dans *Proceedings of the Second International Conference on Application of Concurrency to System Design*, pages 133–142, Newcastle upon Tyne, Grande-Bretagne, Juin 2001. IEEE Computer Society. Press Order Number PR01071 Library of Congress Number 2001090878 ISBN 0-7695-1071-X.
- [9] Charles ANDRÉ. A synchronous approach to reactive system design. Dans *12th EAEEIE Annual Conf.*, pages 349–353, Nancy, France, Mai



2001. Also available at <http://www.eaeeeie.org/conf2001PG/fr/index.html>.
- [10] Charles ANDRÉ et Marie-Agnès PERALDI-FRATI. Behavioral Specification of a Circuit Using SyncCharts: a Case Study. Dans *Euromicro 2000, Digital System Design*, pages 91–98, Maastricht, Pays Bas, Septembre 2000. IEEE.
- [11] Charles ANDRÉ, Marie-Agnès PERALDI-FRATI, et Jean-Paul RIGAULT. Integrating the Synchronous Paradigm into UML: Application to Control-Dominated Systems. Dans *UML « 2002 »*, pages 163–178, Dresden, Allemagne, Octobre 2002. Springer-Verlag.
- [12] Charles ANDRÉ, Marie-Agnès PERALDI-FRATI, et Jean-Paul RIGAULT. Scenario and property checking of real-time systems using a synchronous approach. Dans *Fourth IEEE International Symposium on Object-Oriented Real-Time Distributed Computing (ISORC 2001)*, pages 438–444, Magdeburg, Allemagne, Mai 2001.
- [13] Charles ANDRÉ et Jean-Paul RIGAULT. Variations on the semantics of graphical models for reactive systems. Dans *SMC'02*, ISBN: 2-9512309-4-x, Hammamet, Tunisie, Octobre 2002. IEEE Press. On CD-ROM, index: TA2L2.
- [14] Charles ANDRÉ et T. TANZI. Rapid Prototyping of a TeleGeomatic Application. Dans *TeleGeo'99*, pages 184 – 186, Lyon, France, Mai 1999.
- [15] Frédéric MALLET et Fernand BOÉRI. Esterel and Java in an Object-oriented framework for Heterogeneous Software and Hardware system Modelling and Simulation: The SEP approach. Dans *Euromicro 1999, Digital System Design*, pages 214–227, Milan, Italie, Septembre 1999. IEEE.
- [16] Frédéric MALLET et Fernand BOÉRI. Architecture validation in object-oriented framework. Dans *European Simulation Multiconference*, pages 139–145, Prague, République Tchèque, Juin 2001.
- [17] Frédéric MALLET, Fernand BOÉRI, et J-F. DUBOC. SEP: simulation framework to evaluate rapid-prototyped hardware architectures. Dans *European Simulation Multiconference*, pages 355–359, Ghent, Belgique, Mai 2000.
- [18] Frédéric MALLET, Daniel GAFFÉ, et Fernand BOÉRI. Concurrent control system: from Gafcet to VHDL. Dans *Euromicro 2000, Digital System Design*, pages 230–234, Maastricht, Pays Bas, Septembre 2000. IEEE.
- [19] Pascal RAPICAULT et Jean-Paul RIGAULT. Open Implementation of UML Meta-model(s): Making Meta-modeling and Meta-programming Meet. Dans Akinori YONEZAWA et Satoshi MATSUOKA, éditeurs, *Metalevel Architectures and Separation of Crosscutting Concerns*, numéro 2192 dans LNCS, pages 276–277, Kyoto, Japon, Septembre 2001. Reflection 2001, Springer.
- [20] Pascal RAPICAULT, Jean-Paul RIGAULT, et Luc BOURLIER. Model, Notation, and Tools for Verification of Protocol-based Components Assembly. Dans Judith BISHOP, éditeur, *Component Deployment*, numéro 2370 dans LNCS, pages 257–268, Berlin, Allemagne, Juin 2002. IFIP-ACM Working Conference, CD 2002, Springer.

### Présentations dans des colloques nationaux avec actes

- [21] Charles ANDRÉ et Hedi BOUFAIED. Vérification de comportement de machine d'exécution. Dans *MSR'99 (Modélisation des Systèmes Réactifs)*, pages 121 – 130, Cachan, France, Mars 1999. Hermès.
- [22] Charles ANDRÉ et Robert DE SIMONE. Programmation synchrone : propriétés dans une réaction. Dans *MSR'2001*, pages 547–561, Toulouse, France, Octobre 2001. Hermès Science Publications.
- [23] Charles ANDRÉ, Marie-Agnès PERALDI-FRATI, et Daniel GAFFÉ. Plate-forme pour l'étude et la conception de systèmes automatisés. Dans *Technologies de l'information et de la communication dans les enseignements d'ingénieurs et dans l'industrie*, pages 121–126, Troyes, France, Octobre 2000. TICE'2000.
- [24] Charles ANDRÉ et T. TANZI. Modélisation synchrone appliquée à la sûreté de fonctionnement. Dans *12° Colloque National de Sûreté de fonctionnement ( $\lambda - \mu$  12)*, pages 67–77, Montpellier, France, Mars 2000. ASF.
- [25] Lionel BLANC, Marie-Agnès PERALDI-FRATI, et Charles ANDRÉ. R-PORTS : Une plate-forme d'aide à la conception d'applications réparties. Dans *MSR'99 (Modélisation des Systèmes Réactifs)*, pages 395 – 404, Cachan, France, Mars 1999. Hermès.
- [26] Frédéric MALLET et Fernand BOÉRI. Validation d'architectures dans un environnement orienté objet. Dans *Symposium en Architectures nouvelles de machines*, pages 1–10, Paris, France, Avril 2001.
- [27] Frédéric MALLET et Fernand BOÉRI. Réutilisation : objets et/ou composants. Dans *CN-RIUT2002*, pages 223–228, Tome 1, Le Creusot, France, Juin 2002. ISBN: 2-9509506-2-0.
- [28] Marie-Agnès PERALDI-FRATI, Charles ANDRÉ, et Jean-Paul RIGAULT. UML et le paradigme synchrone : application à la conception de contrôleurs embarqués. Dans *RTS'2002*, pages 71–89, Paris, France, Mars 2002. Teknea.

### Présentations dans des colloques sans actes ou avec actes à diffusion restreinte

- [29] Charles ANDRÉ. Paradigmes objet et synchrone dans les systèmes temps réel. Journée SEE « Sys-

- tèmes informatiques de confiance », cercle « Objectif zéro défaut », Janvier 2001.
- [30] Charles ANDRÉ, Marie-Agnès PERALDI-FRATI, et Jean-Paul RIGAULT. UML et Langages synchrones. Journée SEE « Systèmes Informatiques de Confiance », cercle « Objectif zéro défaut », Septembre 2001.
- [31] Daniel GAFFÉ et Isabelle SCHMID. Modélisation de la commande de la machine indexa par SyncCharts. COSED groupe de travail, Club EEA, Décembre 2001.
- [32] Marie-Agnès PERALDI-FRATI. Exemple d'un contrôleur de siège automobile. Journée SEE « Systèmes Informatiques de Confiance », cercle « Objectif zéro défaut », Septembre 2001.
- [33] Marie-Agnès PERALDI-FRATI, Charles ANDRÉ, et Jean-Paul RIGAULT. Modeling a Speed Regulator System with « Synchronous » UML: a Case Study. UML 2000 Workshop, Octobre 2000.
- [34] Marie-Agnès PERALDI-FRATI, Charles ANDRÉ, et Jean-Paul RIGAULT. Modeling a Speed Regulator System with « Synchronous » UML: a Case Study. SIVOES Workshop, ECOOP 2001, Juin 2001.
- [35] Pascal RAPICAULT et Frédéric MALLETT. Behavioral Specification of Java Components using SyncCharts. Workshop on *Pervasive Component Systems*, ECOOP 2000, Juin 2000.
- [36] Charles ANDRÉ et Robert DE SIMONE. Synchronous programming: Properties within a reaction. Rapport technique RR-2002-15, I3S, Sophia-Antipolis, France, Avril 2002.
- [37] Charles ANDRÉ. Synchronous Interface Behavior: Syntax and Semantics. Rapport technique RR-00-11, I3S, Sophia-Antipolis, France, Décembre 2000.
- [38] Charles ANDRÉ et Marie-Agnès PERALDI-FRATI. Behavioral Specification of a Circuit Using SyncCharts: a Case Study. Rapport technique RR -2000-06, I3S, Sophia-Antipolis, France, Mars 2000.
- [39] Daniel GAFFÉ et Marie-Agnès PERALDI-FRATI. The Bended Refractor of Côte d'Azur Observatory. Rapport technique RR-1999-24, I3S, Sophia-Antipolis, France, Décembre 1999.
- [40] Daniel GAFFÉ et Marie-Agnès PERALDI-FRATI. The Bended Refractor of Côte d'Azur Observatory. Rapport technique RR-2002-25, I3S, Sophia-Antipolis, France, Juillet 2002.
- [41] Frédéric MALLETT et Fernand BOÉRI. Modélisation orientée-objet d'architectures numériques hétérogènes matérielles-logicielles. L'approche SEP. Rapport technique RR-1999-06, I3S, Sophia-Antipolis, France, Juin 1999.
- [42] Frédéric MALLETT et Fernand BOÉRI. Architectures embarquées et validation dans un environnement orienté objet. Rapport technique RR-2002-01, I3S, Sophia-Antipolis, France, Février 2002.
- [43] Marie-Agnès PERALDI-FRATI, Charles ANDRÉ, et Jean-Paul RIGAULT. UML et le paradigme synchrone : application à la conception de contrôleurs embarqués. Rapport technique RR-2002-02, I3S, Sophia-Antipolis, France, Février 2002.
- [44] J-F. DUBOC, Frédéric MALLETT, et Fernand BOÉRI. Enhancements to object-oriented electronic circuit design modeling and simulation environment. Brevet international avec Philips Semi-Conductors : n°09-577,509, Mai 2000.

### Rapports de recherche

### Brevets