

Systemes à événements discrets : de la simulation à l'analyse temporelle de la décision en agriculture

Olivier Naud¹, Tu Tuitete¹, Bertrand Léger^{1,2}, Arnaud Hélias³ et Rodolphe Giroudeau⁴

¹ UMR ITAP, Cemagref-Supagro, 34196 Montpellier cedex 5

(email: prenom.nom@cemagref.fr)

² UMR Santé Végétale, INRA-ENITAB, 33883 Villenave d'Ornon cedex

³ UMR782 GMPA, INRA-AgroParisTech, 78850 Thiverval-Grignon

⁴ LIRMM, UMR UM2-CNRS C5506, 34392 Montpellier cedex 5

Résumé— La recherche agro-environnementale repose de plus en plus sur des approches systémiques et la simulation informatique. Nous montrons ici l'intérêt des automates et autres formalismes de Systèmes à Événements Discrets (SED) dans une démarche de conception des processus de décision en production agricole. Nous assignons deux objectifs à cette conception. Le premier est d'analyser la performance attendue du système selon les critères du développement durable. Le second est de réaliser un transfert de connaissances et d'expertise au travers des modèles de processus de décision. Un tel transfert est une condition nécessaire à l'expérimentation à grande échelle de systèmes innovants complexes.

Nos exemples concernent les traitements de deux maladies de la vigne, le mildiou et l'oïdium. L'objectif est de réduire le nombre de traitements, actuellement responsable d'une forte consommation de pesticides par la viticulture. Nous présentons un aperçu de nos modèles réalisés dans deux formalismes : les Statecharts et les automates temporisés. Les Statecharts ont servi de support à l'élicitation des connaissances d'une équipe de phytopathologistes et d'outil de simulation à l'échelle de la parcelle. La vérification (« model-checking ») des automates temporisés est utilisée à l'analyse de faisabilité temporelle des décisions prises parcelle par parcelle dans une utilisation efficiente des ressources de l'exploitation.

Mots clés— Automates temporisés ; Processus de décision ; Statecharts ; Traitement phytosanitaire

I. CONCEVOIR DES PROCESSUS DE DECISION POUR UNE AGRICULTURE DURABLE

Les représentations par automates et les différents formalismes des Systèmes à Événements Discrets (SED) sont utilisés depuis longtemps dans la conception de systèmes réactifs pour des automatismes industriels [1] et des systèmes de supervision [2,3].

Ce travail a été mené avec le soutien financier de l'ANR «Agence Nationale de la Recherche» pour le programme «Agriculture et Développement Durable», projet «ANR-05-PADD-01, Vin&Environnement».

e-STA copyright © 2008 by see

Volume 5 (2008), N°2 pp 52-56

Pour la gestion environnementale et la conception de systèmes agricoles et sylvicoles durables, la recherche et le développement font de plus en plus appel à la simulation en complément d'études de laboratoire ou de terrain [4,5]. Les règles de gestion technique doivent donc être modélisées. La simulation de la dynamique des systèmes biotechniques permet en effet de multiplier les situations étudiées et d'étudier l'intérêt d'un jeu de règles données, ceci au regard des pratiques des agriculteurs ou de préconisations alternatives et selon le profil climatique de l'année. L'enjeu est de gérer des compromis entre la maîtrise de la production et la prévention des impacts environnementaux. Ceci conduit à des processus de production d'une complexité croissante et qui nécessitent des instruments d'aide à la décision. A l'exception des automates cellulaires, les SED sont encore peu mobilisés dans ces problématiques agri-environnementales. On recense dans la littérature l'usage des DEVS de Zeigler [6] comme cadre de simulation [7]. Les réseaux de Petri ont été employés pour implémenter les modèles de comportement de Systèmes Multi-Agents (exemple faunistique avec [8]).

Avec cette optique de conception système, nous allons montrer ici l'intérêt des SED pour formaliser, simuler et vérifier des *processus de décision* [9] en production agricole. Avec le vocable *processus*, nous mettons l'accent sur la représentation des aspects temporels de la décision. Notre application concerne la protection phytosanitaire de la vigne contre les maladies oïdium et mildiou, l'objectif étant de réduire le nombre de traitements par rapport aux pratiques usuelles, fortement consommatrices de pesticides. Ces travaux de modélisation ont été menés avec des concepteurs de règles techniques de lutte phytosanitaire, spécialisés dans les maladies de la vigne [10].

Après un rapide énoncé des formalismes SED utilisés, nous décrirons les concepts modélisés, et donnerons un aperçu du modèle de simulation réalisé. Le processus de décision est ici défini à l'échelle de la parcelle agricole et la simulation de ce processus est déterministe. Nous envisagerons ensuite le

passage à un modèle SED dit temporisé, qui n'est pas déterministe en termes temporels. Nous montrerons ensuite l'intérêt de méthodes de vérification (« model-checking ») sur ce deuxième type de modèle pour analyser la faisabilité de décisions de protection phytosanitaire prises parcelle par parcelle dans l'organisation du travail au niveau global de l'exploitation. Basée sur les outils et formalismes génériques des SED, notre approche de la modélisation nous fait bénéficier des acquis scientifiques antérieurs dans d'autres domaines d'application. Elle nous permet d'espérer trouver des applications de nos résultats dans une large gamme de problèmes de gestion environnementale et de production.

II. FORMALISMES

A. Statecharts : de la modélisation à la simulation

Le travail de modélisation même, par le recueil et la formalisation de connaissances qu'il implique, doit aider les concepteurs à spécifier plus précisément ces règles. Nous avons choisi pour cela les Statecharts [11] qui sont maintenant normalisés au sein de UML (Unified Modelling Language) 2.0 [12]. Ils permettent de combiner des automates à états finis suivant deux principes: le "parallélisme" (automates concurrents) et l'inclusion hiérarchique. L'inclusion signifie que chaque état peut être décomposé en un automate qui décrit le comportement avec une granularité plus fine. Les transitions sont étiquetées avec des événements déclencheurs, des actions (qui sont des événements déclenchés) et des conditions. Les conditions sont des tests sur les variables définies dans le Statechart. Enfin, des nœuds de décision permettent de représenter plusieurs choix possibles de transition à partir d'un même état et d'un même événement. Cette expressivité permet des synchronisations complexes entre automates. Sous conditions d'implémentation, les transitions sont réputées être franchies instantanément, ce qui permet de considérer les statecharts comme des systèmes réactifs [13]. Après transformation en code exécutable, le comportement de ces spécifications visuelles peut être testé suivant différentes conditions initiales et stimuli externes. Voir une illustration de la syntaxe en figure 1.

A partir de ces Statecharts, nous pouvons simuler la résultante du processus de décision. Dans notre application viticole, cette résultante est caractérisée par le nombre de traitements phytosanitaires et la répartition de ces traitements dans le temps. Au sein du groupe projet « Vin et Environnement » [14], nous avons en effet considéré le nombre de traitements phytosanitaires comme un indicateur simple et pertinent de performance environnementale. Il s'agit de substituer une gestion raisonnée du risque à une action exclusivement préventive et systématique.

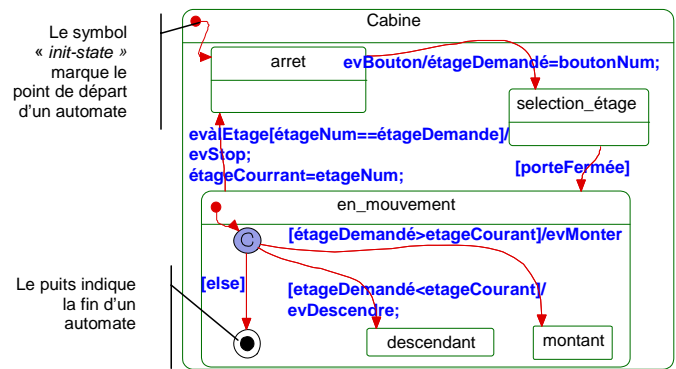


Fig. 1. Illustration syntaxe Statecharts : cabine d'ascenseur

B. Automates temporisés : analyse et mise en œuvre de la décision

Nous travaillons à l'analyse des caractéristiques temporelles du processus de décision, et plus largement du processus résultant de l'interaction entre décision, mise en œuvre, et processus biotechniques. Pour ce faire, nous mobilisons le model-checking temporisé.

Introduit par Alur et Dill [15], l'automate temporisé est un automate à états finis auquel est ajoutée une représentation du temps continu sous la forme d'horloges à valeurs dans \mathbb{R}^+ . Ces horloges permettent d'introduire des contraintes temporelles qui peuvent être associées aux états (sommets du graphe) et aux transitions (arcs du graphe) de l'automate discret. Ces contraintes sont de la forme $x \# c$ ou $x - y \# c$, avec x et y deux horloges, c une constante et $\#$ un symbole de relation de l'ensemble $\{<, \leq, =, \geq, >\}$. Les valeurs des horloges croissent uniformément dans le temps. Sur une transition, il est possible de remettre à zéro une ou plusieurs horloges, ce qui permet de représenter des durées.

Dans l'exemple donné figure 2, il est spécifié que l'on ne peut rester plus de 9 heures au bureau (« invariant » de l'état 1), et pas moins de 7 heures (contrainte sur transition μ).

Les outils de model-checking permettent la vérification automatique de propriétés d'un système, à travers l'affirmation ou la négation de questions formulées dans un langage spécifique. Pour le model-checking des automates temporisés, les requêtes sont exprimées dans la logique temporelle TCTL (Timed CTL, par extension de CTL pour Computational Tree Logic) [16].

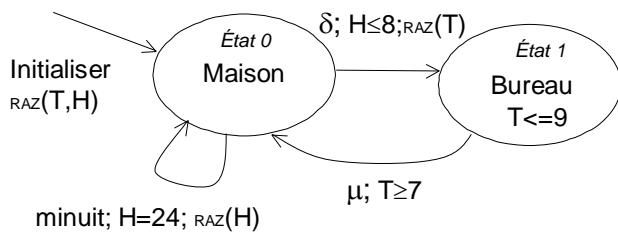


Fig. 2. Illustration syntaxe Automates temporisés : journée au bureau

Largouët [17] a utilisé le formalisme des automates temporisés associé aux outils de model-checking [18] afin d'améliorer la classification d'images satellites et aériennes de parcelles agricoles par vérification de séries temporelles d'images sur un modèle de succession culturale. Hélias [19] a utilisé ces mêmes formalismes dans une optique de simulation de la décision d'épandage d'effluents d'élevages. La décision était prise selon l'analyse de l'adéquation entre les contraintes temporelles de la source d'effluents et les contraintes temporelles des cultures potentiellement réceptrices.

Il serait formellement envisageable de passer automatiquement d'une description Statecharts à des automates temporisés, afin de réaliser ensuite du model-checking temporisé [20]. Cependant nous séparons actuellement les problèmes de simulation et d'analyse. Pour l'analyse temporelle, nous réécrivons les processus de décision sous la forme d'automates temporisés.

III. MODELISATION ET SIMULATION DES DECISIONS

Nous modélisons des processus de décision pour la lutte contre des maladies de la vigne ainsi que les contraintes qui s'exercent sur leur mise en œuvre. En particulier, nous étudions la faisabilité de processus où l'opportunité de traitement est décidée séparément pour chaque parcelle, alors que la pratique usuelle est de réaliser les traitements sur tout ou partie d'une exploitation sur la base d'une décision unique. Ce raisonnement spécifique, qui s'accompagne d'une observation précise des symptômes des maladies, doit conduire à diminuer, globalement, le nombre de traitements. La mise en œuvre de ces "décisions à la parcelle" et la coordination de l'utilisation des ressources de l'exploitation, seront abordées plus loin.

Les principaux concepts du modèle de décision à la parcelle sont les suivants :

- La décision étant structurée par le passage d'un engin mécanisé, la **parcelle** est avant tout un bloc cohérent de travail à laquelle sont attachées différentes caractéristiques agronomiques. Elle représente, sur l'horizon de planification du travail une tâche de traitement à déclencher ou non. Dans la mesure où aucun autre opérateur ne peut rentrer dans une parcelle qui est en cours de traitement ou vient d'être traitée, une parcelle est aussi une ressource, libre ou non à un instant donné.

- Les **stades phénologiques** codifient la pousse annuelle de la vigne depuis le débourrement (éclatement des bourgeons) jusqu'à la vendange. On considère un stade phénologique médian pour la parcelle.
- Pour la météorologie, nous considérons les températures et les pluviométries journalières. On distingue la pluie prévue par la météo, utilisée pour la décision, de la pluie réelle.
- **Pathologies et épidémies** : Nous considérons l'oïdium (*Erysiphe necator*) et le mildiou (*Plasmopara viticola*), deux maladies à micro-champignons, dites "cryptogamiques". Les agents pathogènes sont stockés sur les bois ou au niveau du sol pendant l'hiver. Ils se développent (pour former un mycelium) en saison sur feuilles puis sur grappes. L'épidémie se propage, à partir des "foyers primaires" qui libèrent des spores, la contamination se faisant par gravité et par le vent. L'humidité et les pluies jouent un grand rôle dans la virulence de ces maladies et conditionnent les nouvelles contaminations..
- L'action des produits de traitement est caractérisée par une période de "**rémanence**" établie expérimentalement lors de l'homologation du produit. Cette rémanence, qui intègre les effets liés à la croissance du végétal, n'est pas à confondre avec la durée d'activité chimique du produit.
- **Ressources matérielles** : On considère, suivant la taille de l'exploitation, un ou plusieurs ensembles (tracteur+pulvérisateur). En effet, dans la mesure où les traitements phytosanitaires sont systématiquement prioritaires dans l'organisation du travail, un tracteur est toujours disponible lorsqu'un pulvérisateur l'est.

Nous avons modélisé un processus de décision permettant de gérer de façon combinée le mildiou et l'oïdium. Nous le désignerons ci-après PDMO. La conception initiale, non formelle, était le fruit d'un travail d'une équipe de phytopathologistes. Elle mettait en œuvre un raisonnement sur la saison viticole découpée en plusieurs étapes qui correspondent aux grandes phases du développement de la vigne. En raison de cet aspect séquentiel, le recueil de connaissances a été réalisé d'emblée sous la forme d'un SED. Le choix s'est porté sur les Statecharts pour la simplicité du vocabulaire graphique, et la possibilité de détailler le modèle de façon incrémentale.

La décomposition en étapes est représentée figure 3. Les bandeaux rouges et verts correspondent à des traitements respectivement « obligatoires » et « facultatifs » (raisonnés suivant informations disponibles). Ce découpage est repris au niveau hiérarchique le plus élevé du Statechart (figure 4).

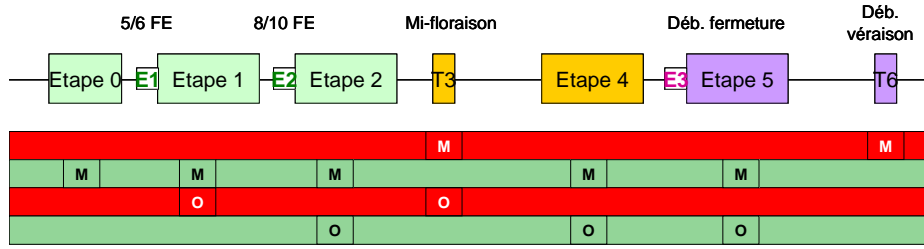


Fig. 3. Découpage de la saison viticole en étapes de raisonnement

Pour chaque étape, nous avons détaillé le PDMO au moyen d'un recueil de connaissances [21]. Nous avons étudié ensuite la réponse aux scénarios bioclimatiques par simulation (traitements pour chacune des deux maladies). A l'intérieur d'une étape (exemple figure 5), le raisonnement lié à l'analyse de l'état sanitaire de la parcelle est mis en évidence par les nœuds de décision. La logique de réaction aux événements pluvieux et la mise en œuvre des traitements est décrite par les états et transitions associées.

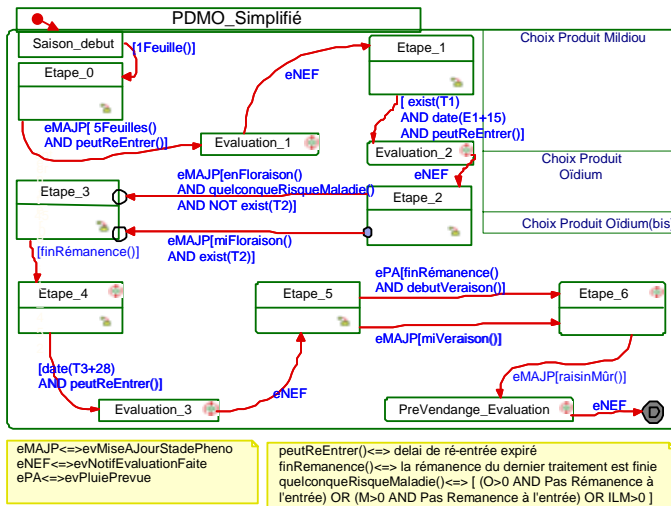


Fig. 4. Synoptique général Statecharts PDMO

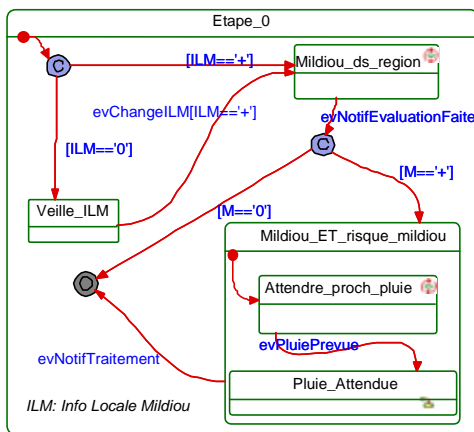


Figure 5. Détail d'une étape

IV. ANALYSER LA FAISABILITE TEMPORELLE DE TRAVAUX AGRICOLES

Le PDMO correspond à un ordre de traitement pour chaque parcelle. Mais, concrètement, la capacité d'une cuve de pulvérisateur permet de traiter plusieurs parcelles à la suite. Il convient donc de regrouper les traitements décidés dans des lots les plus conséquents possibles, afin de limiter les temps de préparation et les aller-retour entre lieu de remplissage et lieux d'épandage. Le critère de proximité entre parcelles joue un rôle, mais l'essentiel pour respecter la décision à la parcelle est d'avoir dans un même lot des parcelles pouvant être traitées le même jour.

La deuxième limitation du Statechart du PDMO est, faute d'un modèle complet de l'exploitation viticole, de s'interpréter ainsi : chaque décision de traitement doit être exécutée « le plus vite possible ». Pour pouvoir planifier les travaux, nous avons besoin de décisions de la forme traiter entre $date_{min}$ et $date_{max}$, qui sont respectivement les dates au plus tôt et au plus tard (« fenêtre temporelle »).

Les automates temporisés nous permettent de décrire ce problème de façon modulaire et le model-checking TCTL de le résoudre de façon progressive (ici avec l'outil Kronos [18]). Nous avons mis en place une méthode avec un processus de décision moins complexe que PDMO, ne gérant que le mildiou (figure 6).

Le model-checking est mis en œuvre sur un ensemble d'automates temporisés: automate de décision à la parcelle, automate décrivant la phénologie, automate décrivant les pluies, suivant la procédure résumée figure 7. Au moment d'effectuer la vérification pour une parcelle donnée, on réalise le produit des automates ce qui permet leur synchronisation. Par une requête dite d'« atteignabilité », bornée par l'horizon de planification, d'un sommet vérifiant le prédicat TT1 ou TT2 "traitement nécessaire", on obtient la fenêtre temporelle pour chaque parcelle devant être traitée [22].

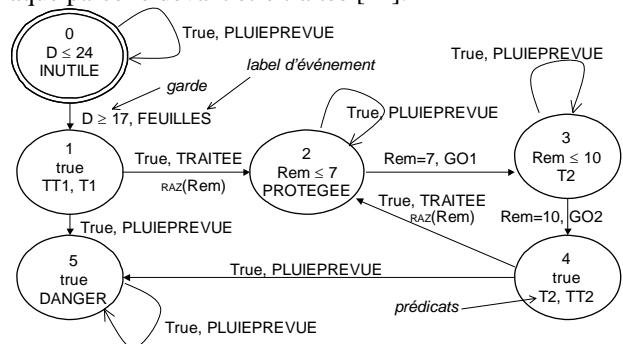


Fig. 6. Processus de décision simplifié : gestion du mildiou

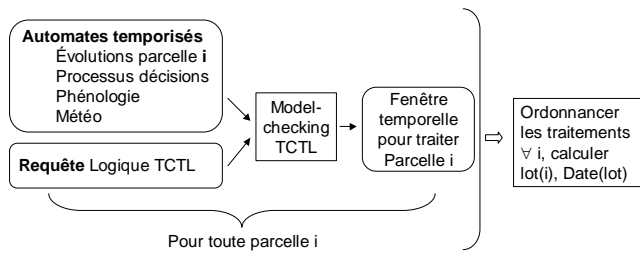


Fig. 7. Procédure de vérification de faisabilité des décisions

Il s'agit ensuite d'en évaluer la faisabilité dans les délais requis, ce qui suppose de proposer un ordonnancement couplé à un problème de voyageur de commerce. Il serait théoriquement envisageable de réaliser la combinaison de ces contraintes en représentant les fenêtres temporelles des parcelles sous forme d'automates temporisés, d'en réaliser le produit, puis de chercher des solutions d'organisation du travail par model-checking. Il y a deux limites à cela. La première réside dans le grand nombre d'états à parcourir ("explosion combinatoire"). Ensuite, le model-checking permet de vérifier la faisabilité, mais pas de choisir la meilleure solution dans un ensemble de solutions possibles. En fonction des fenêtres temporelles, un ordonnancement efficace des travaux doit donc être réalisé par des techniques d'optimisation. Le model-checking nous permettra ensuite de vérifier la faisabilité de l'ordonnancement décidé en cas de changement dans les prévisions de pluies.

V. CONCLUSION

Nous avons présenté ici des résultats montrant l'intérêt de deux formalismes de systèmes réactifs, les Statecharts et les automates temporisés, pour décrire et analyser des processus de décision en production agricole. Les Statecharts ont été mis en œuvre de façon opérationnelle pour recueillir de la connaissance, formaliser un processus de décision sophistiqué et le simuler. Une première approche d'analyse temporelle, utilisant le model-checking temporisé, a été présentée sur un processus de décision simple. Les travaux se poursuivent dans deux directions: (i) dériver des automates temporisés à partir du Statechart PDMO, (ii) définir une méthode d'ordonnancement générique pour nos problématiques agricoles, capable de proposer un approché de l'optimum.

REMERCIEMENTS

Nous remercions vivement les membres du laboratoire de l'INRA Santé Végétale avec qui nous collaborons activement, ainsi que l'équipe du projet ANR-ADD "Vin et Environnement" (Soler, 2005). Remercions également les concepteurs de Kronos (Yovine, 1997).

REFERENCES

- [1] Zaffalon L., Bréguet P. (2001) Conception de systèmes réactifs. Visions. http://eig.unige.ch/lii/Fichiers_Distr/Publications/Systeme_reactif.pdf
- [2] Lunze J. (2000) Process supervision by means of qualitative models. *Annual Reviews in Control*, **24**, 41–54.

- [3] Paoli A., Lafortune S. (2005) Safe diagnosability for fault-tolerant supervision of discrete event systems. *Automatica* **41-8**, 1335–1347.
- [4] Martin-Clouaire R., Rellier J.-P. (2003) Modélisation et simulation de la conduite d'un système de production agricole. In *4^e conf. de modélisation & simulation (MOSIM'03) Toulouse (F)*, 699–704.
- [5] Cros M.-J., Duru M., Garcia F., Martin-Clouaire R. (1999) A DSS for rotational grazing managements: simulating both the biophysical and decision making processes. In *Int. Congress on Modelling and Simulation, (Modsim) Hamilton (New-Zealand)*, 759–764.
- [6] Zeigler B.P., Moon Y., Kim D., Ball G. (1997) The DEVS environment for high-performance modeling and simulation. *Ieee Computational Science & Engineering* **4-3**, 61–71.
- [7] Filippi J.-B., Bisgambiglia P. (2004) Jdevs: An implementation of a DEVS based formal framework for environmental modelling. *Environmental Modelling and Software* **19-3**, 261–274.
- [8] Bakam I., Kordon F., Le Page C., Bousquet F. (2001) Formalization of a spatialized multiagent model using coloured petri nets for the study of an hunting management system. *Lecture Notes In Computer Science*, **1871**, 123–132. *Workshop FAABS 2000*.
- [9] Naud O., Barbier J.-M. (2005) Analyse des processus de décision (protection des vignes), *Journées Phytosanitaires Régionales, 10-11 février, Villenave d'Ornon (F)*
- [10] Clerjeau M. (2004) Le problème de la décision des interventions phytosanitaires en protection intégrée de la vigne. In *Innovigne et Vin, Gruissan (France)*. 16-17 juin.
- [11] Harel D. (1987) Statecharts: a visual formalism for complex systems. *Science of Computer Programming*, **8-3**, 231–274.
- [12] OMG. (2005) Unified modeling language (UML) specification, v 2.0. www.omg.org/technology/documents/formal/uml.htm et www.omg.org/cgi-bin/doc?formal/05-07-05.
- [13] Scholz P. (1998) Design of Reactive Systems and their Distributed Implementation with Statecharts. *Phd thesis, Technischen Universität (TUM), München*.
- [14] Soler, L.-G. (2005) Quelles interventions publiques et privées pour réduire l'utilisation de traitements phytosanitaires dans le secteur du vin?. www.inra.fr/internet/Projets/add-vin/.
- [15] Alur R., Dill D. L. (1990) Automata for modeling real-time systems. In *17th ICALP, Warwick University (England)*, 322–335. Voir aussi dans (1994) A theory of timed automata. *Theoretical Computer Science* **126-2**, 183-235
- [16] Alur R., Courcoubetis C., Dill D.L. (1990) Model-checking in dense real-time. In *Proc. 5th LICS, Philadelphia (USA)*, 414-425. Version révisée dans (1993) *Information and Computation* **104-1**, 2-34.
- [17] Largouët C. (2000) Aide à l'interprétation d'une séquence d'images par la modélisation du système observé. Application à la reconnaissance de l'occupation du sol. *Thèse de doctorat, Université de Rennes I*. 195 p.
- [18] Yovine S. (1997) Kronos: A verification tool for real-time systems. (kronos user's manual release 2.2). *J^{nl} of Software Tools for Technology Transfer* **1-(1-2)**, 123–133.
- [19] Hélias A. (2003) Agrégation/abstraction de modèles pour l'analyse et l'organisation de réseaux de flux: application à la gestion des effluents d'élevage à la Réunion. *thèse de doctorat, ENSA-M, Montpellier, soutenue le 18/12/2003*. 222 p.
- [20] Ober I., Graf S., Ober, I. (2006) Validating timed uml models by simulation and verification. *Int. J^{nl} on Software Tools for Technology Transfer (STTT)* **V8-2** (2006), 128–145.
- [21] Léger B., Naud O. (2007) Experimenting statecharts for multiple experts knowledge elicitation in agriculture. *IFAC-MCPL, Sibiu (Roumanie)*, 27-30 sept.
- [22] Naud O., Tuitete T., Léger B., Hélias A., Hernandez F., Giroudeau R. (2007) Systèmes réactifs pour modéliser la décision en production agricole: Exemples à propos des traitements phytosanitaires, in *MSR'2007 - Modélisation des Systèmes Réactifs, Lyon (France)*, 17-19 oct.