



**HAL**  
open science

# Mise en œuvre du MDE pour la conception de systèmes embarqués: premiers résultats et perspectives du projet Lambda

Sébastien Demathieu, Yves Bernard, Laurent Maillet-Contoz, Matteo Bordin, Frédéric Mallet

## ► To cite this version:

Sébastien Demathieu, Yves Bernard, Laurent Maillet-Contoz, Matteo Bordin, Frédéric Mallet. Mise en œuvre du MDE pour la conception de systèmes embarqués: premiers résultats et perspectives du projet Lambda. *Génie logiciel: le magazine de l'ingénierie du logiciel et des systèmes*, 2010, 93, pp.38-42. inria-00545266

**HAL Id: inria-00545266**

**<https://inria.hal.science/inria-00545266>**

Submitted on 21 Nov 2017

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

# Mise en œuvre du MDE pour la conception de systèmes embarqués: premiers résultats et perspectives du projet Lambda

Sébastien Demathieu (Thales), Yves Bernard (Airbus), Laurent Maillet-Contoz (STMicroelectronics), Matteo Bordin (Adacore), Frédéric Mallet (INRIA/I3S)

**Résumé :** Démarré en juin 2008, Lambda est un projet de recherche collaboratif rassemblant 14 partenaires industriels, PME et académiques. Le projet se focalise sur la modélisation de plateformes d'exécutions dans le contexte de la conception de systèmes embarqués. Il vise des assemblages complexes de composants sur étagères, dans le cadre de cas de test représentatifs des problèmes actuels rencontrés par les intégrateurs système (contrôle de latences réseau, configuration des tâches et ordonnancement.) Un premier objectif est de démontrer la faisabilité technique, ainsi que l'intérêt, de la modélisation de plateformes, comme un moyen de valider le déploiement et la configuration des composants du système. Un second objectif vise à réconcilier les standards appropriés (SysML, MARTE, AADL, IP-XACT) avec les standards de facto (déjà implémentés dans des outils d'analyse ou de simulation largement répandus). Un an et demi après son démarrage, Lambda fournit déjà des résultats visibles. Une utilisation intensive de SysML/MARTE dans des expérimentations de modélisation a permis d'identifier des bonnes pratiques, ainsi qu'un sous-ensemble de MARTE applicable dans un contexte d'ingénierie système. Les problématiques clés liées au déploiement massif du MDE dans l'industrie (MCO des ateliers de modélisation, passage à l'échelle) ont commencé à être adressées. Des actions concrètes d'alignement des standards (SysML, MARTE, AADL) et la convergence entre standards et outils commerciaux conduit à un panorama plus clair dans ce domaine. L'article décrit le contexte technique ainsi que les problématiques adressées par le projet Lambda. Après avoir présenté les objectifs du projet et le partenariat, il détaille les travaux en cours et présente une vue d'ensemble des premiers résultats. En conclusion, l'article évoque le travail restant dans le projet, ainsi que les perspectives pour les partenaires impliqués.

**Mots clés :** Model-Based System Engineering, Embedded Systems, SysML, MARTE, AADL, IP-XACT

## 1. INTRODUCTION

Selon l'étude présentée à l'initiative du Ministère de l'Industrie, Syntec informatique et le RNTL aux cours des premières Assises Françaises du Logiciel Embarqué qui se sont tenues le 7 mars 2007 à Paris [1], 98 000 emplois en France sont liés au développement, à l'exploitation et la maintenance de systèmes embarqués. Selon cette même étude, une minorité (20%) des acteurs de l'embarqué souhaitent voir émerger des standards de développement, et seulement 24% ont prévu de s'appuyer sur du matériel standard (découplé du logiciel) pour pérenniser les technologies embarquées.

L'insertion de composants COTS (Commercial Off-The-Shelf) dans les systèmes embarqués est bénéfique par la réduction des coûts de composants et dispose d'un fort potentiel de croissance dans les années à venir. Cette approche introduit cependant un nouveau type de complexité dans la conception des logiciels et bien entendu des problèmes industriels de pérennité et, selon les niveaux de criticité, d'évolution des procédures de certification. Les technologies banalisées (par exemple, processeurs généralistes, réseau Ethernet, système Linux) se caractérisent par une grande flexibilité, souvent synonyme de complexité de mise en œuvre par rapport à des exigences de déterminisme, et toujours synonyme de possibilités multiples de configuration et de paramétrage. L'adaptation de ces technologies banalisées consiste d'une part, à ajouter, dans les implémentations, les garanties de certaines propriétés, assurant notamment le déterminisme des comportements (ceci est la seule solution acceptable pour le « temps-réel dur ») ; d'autre part, à ajouter dans les interfaces des possibilités supplémentaires de paramétrage du comportement.

Dans le contexte de conception par assemblage de COTS, l'exploration de l'espace des solutions possibles est limité et la flexibilité des technologies banalisées ouvre la possibilité de différer certains choix de conception jusqu'aux phases d'intégration logiciel et matériel. Cependant, certains choix critiques (dimensionnement de la puissance de calcul, topologie des réseaux de communication, configuration des logiciels de base, choix des modes de fonctionnement, architecture globale du logiciel applicatif) doivent être arrêtés lors des phases de spécification système, avant le développement logiciel et matériel. Face à une complexité grandissante des systèmes à logiciel prépondérants, associée à de contraintes de plus en plus forte en terme de qualité et de disponibilité, l'utilisation d'outillage support pour aider à la validation amont d'architectures systèmes devient donc un avantage compétitif majeur pour les industriels qui cherchent à mettre en œuvre des approches de conception par assemblage de COTS.

Les technologies de Model-Driven Engineering (MDE) ou Ingénierie Dirigée par les Modèles (IDM), mises en œuvre dans le domaine de la conception logicielle au cours des dernières années (en collaboration entre industriels, académiques et PME, dans le cadre de projets tels que Usine Logicielle [2] ou TOPCASED [3]) forment un socle technologique solide, sur lequel le développement de processus outillés adressant l'ingénierie système peut désormais s'appuyer. C'est dans ce contexte que le projet de recherche System@tic Lambda a été démarré en juin 2008, avec pour objectif de contribuer à l'intégration de plateformes d'exécution banalisées dans le processus de conception système.

## 2. LE PROJET LAMBDA

Le projet de recherche Lambda porte sur la modélisation de plateformes d'exécution embaquées. Il rassemble 14 partenaires industriels, PME et académiques et vise des systèmes embarqués complexes composés d'assemblages sur étagère, sur des cas d'emploi représentatifs de problématiques représentatives des problèmes actuellement rencontrés par les intégrateurs systèmes (par exemple : contrôle des latences sur réseau, configuration des tâches et ordonnancement).

Pour les grands groupes représentés dans le consortium Lambda (Thales, Airbus, STMicroelectronics) couvrant tous les niveaux dans la chaîne d'intégration des logiciels embarqués, il s'agit d'être acteurs de la définition des standards de développement, et de décliner, pour chaque domaine, l'insertion de technologies communes à plusieurs domaines, sinon totalement banalisées. Pour les fournisseurs de plateformes présents dans le consortium (Arion, Adacore, PrismTech, Atego, Kontron), le développement de bibliothèques de modèles ouvrent des perspectives de nouvelles offres d'environnement permettant à leur client de développer, valider et certifier ses applications avec une productivité accrue. Pour les vendeurs d'outils (Esterel Technologies, CoFluent Design, Obeo), les travaux réalisés dans le cadre du projet permettent une mise en œuvre des outils sur des cas industriels et offrent une opportunité d'ouverture de leur technologie vers des standards émergents. Dans ce contexte la contribution d'académiques (INRIA, CEA-List, Supélec) est essentiel pour lever les différents verrous technologiques identifiés.

Les modèles sont réalisés en coopération entre les différents industriels, fournisseurs de plateformes banalisées et vendeurs d'outils impliqués dans le projet. L'interopérabilité entre ces modèles est assurée par l'utilisation conjointe de standard d'ingénierie en cours de convergence: SysML [4], MARTE [5], AADL [6], IP-XACT [7]. Le but final est que les modèles des différents éléments de plateformes réalisés dans les cas d'emploi (processeurs, systèmes d'exploitation, interfaces réseau, commutateurs, logiciel de base) puissent être paramétrés pour permettre une validation amont de l'architecture du système.

Sur la base de descriptions architecturales communes, compatibles des standards SysML/MARTE, deux techniques complémentaires seront mises en œuvre : l'analyse de l'adéquation des ressources, sur la base de propriétés non fonctionnelles associées aux éléments architecturaux – en s'appuyant si nécessaire sur des techniques d'analyse pire-cas (type Response-Time Analysis [8]) ou bien l'utilisation de moteurs de simulation haut niveau (type SystemC TLM [9]). Un verrou technologique, dans ce contexte, est le manque de modèles comportementaux utilisables en phase de conception. De tels modèles devraient être réalisés par assemblage d'éléments de bibliothèque, correspondant aux éléments de la plate-forme d'exécution que l'on veut définir et configurer. Ils devraient être fournis et validés par les fournisseurs de ces éléments de base, de manière analogue à la fourniture d'éléments de modèles TLM pour un sous-système SoC. Le standard MARTE prévoit la possibilité de telles « bibliothèques de modèles », et les mécanismes standard de SysML et UML permettent d'assembler les éléments de bibliothèque avec des scénarios applicatifs, pour constituer un modèle global qui sera exploité par les outils d'analyse ou de simulation, aux fins d'exploration des options de conception. C'est dans cette optique que sont utilisés les modèles de plateforme construits dans le cadre du projet.

Le projet se découpe en trois lots de travail adressant les problématiques évoquées précédemment et qui s'interpénètrent dans le contexte du projet : 1) la faisabilité technique et la pertinence industrielle de la modélisation de plateformes d'exécution, 2) l'intégration et l'interopérabilité entre outils de modélisation et d'ingénierie, et 3) la convergence entre outils et standards. Ces trois points sont détaillés dans les sections suivantes de l'article.

## 3. MODELISATION DE PLATE-FORMES D'EXECUTION

L'objectif méthodologique du projet est l'articulation entre le développement logiciel/matériel et les étapes du processus de conception de systèmes embarqués situées en amont, vers l'ingénierie système. Pour atteindre cet objectif, le projet Lambda s'organise selon les trois axes dont le standard MARTE a permis la structuration :

1. Servir de « langage pivot » entre métiers et en conséquence faciliter les interfaces entre les différents outils spécialisés nécessaires pour ces métiers.

2. Permettre la réalisation de « bibliothèques de modèles », représentant typiquement les composants matériels ou logiciels réutilisés dans le cadre d'une démarche de conception ascendante.
3. En s'appuyant sur les standards généralistes SysML et UML, faire bénéficier les ateliers de conception de systèmes embarqués de la dynamique du marché des outils associés.

Le bénéfice visé pour l'utilisateur final est de prendre les décisions d'architecture liées aux compromis entre les différentes propriétés (performance, fiabilité, consommation par exemple) d'un système embarqué. Ceci n'est possible, dans le cadre d'une conception par réutilisation de composants (COTS) que si des modèles appropriés sont disponibles, pour chaque composant, dans des bibliothèques non propriétaires. Les standards SysML et MARTE sont des conditions nécessaires pour atteindre ces objectifs. Le projet Lambda contribue ainsi à leur consolidation. La prise en compte effective de ces standards par les ateliers de conception est bien sûr indispensable, le projet Lambda y contribue de manière pragmatique.

Les cas d'emploi développés dans le projet mettent en œuvre différents types de plateformes logicielles (systèmes d'exploitation temps-réel, runtimes Ada, Java) et matérielles (single-board computers, réseaux Ethernet temps-réel et AFDX) appliquées dans différents domaines métiers. Pour chaque cas d'emploi, un modèle d'architecture SysML/MARTE a été développé pour modéliser les besoins de l'application (dérivés des exigences) et des capacités de la plate-forme, et des liens d'allocation établissant des contrats d'utilisation de ressource entre éléments de l'application et éléments de la plate-forme. Le modèle a été par la suite raffiné à l'aide d'outils d'analyse et de simulation dédiés (par exemple MAST [10], CoFluent Studio [11]) pour décrire les aspects comportementaux de la plate-forme. La mise en œuvre de ces outils a permis l'évaluation de propriétés non-fonctionnelles de la plateforme. L'ensemble des modèles développés est en cours de validation pour évaluer la pertinence technique et industrielle de l'approche.

Différentes communautés autour des systèmes critiques, haute-performance et de l'Electronic System Level design ont émergé au cours du projet, mettant en œuvre différentes techniques d'évaluation, conjointement avec les standards SysML et MARTE. Dans ces différentes expérimentations, des pratiques communes sont apparues autour d'un sous-ensemble limité de MARTE (Non-Functional Properties, Time and Resource models).

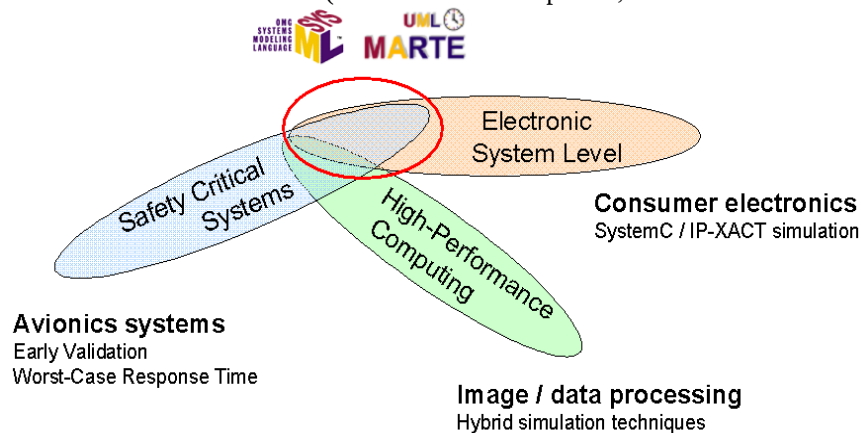


Figure 1: SysML et comme langage pivot pour différentes communautés

Les modèles de plateforme réalisés sont désormais en cours de validation. Les résultats de simulation ou d'analyse sont confrontés à des mesures réalisées sur les plateformes réelles. Ces expérimentations de modélisation ont permis certaines découvertes méthodologiques. Tout d'abord, aucune technique d'analyse ou de simulation ne s'est révélée applicable à tous les cas d'emploi. La mise en œuvre de ces techniques a varié sensiblement en fonction des communautés. Dans les différents cas d'emploi, une utilisation conjointe de SysML et MARTE a fourni toutes fois le support nécessaire pour capturer les besoins de l'application et les capacités des plateformes dans un flot de conception système. Les expérimentations ont mis en évidence le besoin d'un support méthodologique adéquat pour prendre en main le langage MARTE, liée à la taille ainsi qu'à la complexité de la spécification. Un travail de synthèse et de rédaction des conclusions de l'étude suivra la phase de validation des modèles et sera terminée au troisième semestre 2010.

#### 4. INTEGRATION AND INTEROPERABILITE

Le projet Lambda vise à étendre le champ d'application du MDE dans le domaine de l'industrie de haute technologie. La prise en compte du contexte industriel est une condition nécessaire à la dissémination des résultats obtenus au-delà des limites du laboratoire. L'objectif est de caractériser les difficultés prévisibles, de

bien poser les problèmes, d'anticiper les solutions et de commencer à spécifier les contours d'outils de seconde génération.

L'intérêt industriel des outils MDE étant aujourd'hui établi, il est à présent nécessaire de passer à une nouvelle phase qui prenne notamment en compte les aspects hétérogénéité, distribution, réutilisabilité de composants de modélisation à grande échelle, gestion de version, travail collaboratif.

Pour démontrer que le MDE passe industriellement à l'échelle, il faut montrer comment une équipe d'ingénieurs, géographiquement répartie sur plusieurs sites, peut collectivement travailler sur un très grand nombre d'artefacts de modélisation afin de résoudre des problèmes complexes. Par ailleurs la cible applicative des outils de deuxième génération dépasse très largement la simple génération de code. Sans être exhaustif, on peut citer l'interopérabilité sémantique entre outils ou sources de données, la mesure, les tests, l'architecture des systèmes, le contrôle de l'évolution et la plupart des opérations avancées de l'ingénierie. Des projets comme Eclipse Modeling ont montré tout l'intérêt des outils de première génération (EMF, ECORE, GMF, etc.) mais on a aussi montré rapidement leurs limites dans le passage à l'échelle. Le succès de cette première étape nous oblige actuellement à envisager rapidement la suite logique et concrète dans l'évolution du MDE, ce qui motive d'autant plus l'intérêt de ces travaux dans le cadre du projet.

Plusieurs études et activités de prototypage menées dans le projet cherchent à identifier les principaux obstacles au déploiement à large échelle des technologies MDE, à anticiper des solutions techniques et à démarrer un travail de définition de fonctionnalités pour cette seconde génération d'outils. Les thèmes abordés sont la migration de métamodèles dans un contexte de Maintien en Condition Opérationnelle (MCO) des ateliers de modélisation déployés, une série d'études et de benchmarks pour évaluer le passage à l'échelle des référentiels de modèles et des outils de transformation existants, ainsi que des études sur l'intégration de langages synchrones (tels que Lustre) avec SysML/MARTE et l'intégration de propriétés non-fonctionnelles dans SysML.

Les éléments de la complexité, obstacles au passage à l'échelle de l'IDM, identifiés dans le contexte de ces travaux sont :

- La gestion d'un grand nombre d'artefact
- La gestion d'artefacts de grande taille
- La complexité de relations entre artefacts
- L'utilisation de référentiels de modèles
- La construction et l'utilisation de bibliothèques d'artefacts de modélisation réutilisables
- La gestion de la traçabilité
- La gestion de la distribution géographique
- La gestion de travail collaboratif
- La gestion de l'évolution des métamodèles
- La gestion en configuration des modèles
- La gestion multi- points de vue
- La gestion de workflow et dataflow d'ingénierie
- La gestion de l'hétérogénéité technologique
- La gestion des systèmes complexes
- La gestion de modèles non-bornés (data flow, flots infinis)
- La gestion du legacy
- La définition d'un atelier de gestion de systèmes complexes
- L'ergonomie et les problèmes d'affichage d'un grand nombre d'artefacts

Le lancement d'un grand projet sur le sujet apparaît comme la suite logique de cette étude. Le projet Galaxy doit permettre d'exploiter rapidement ce travail commun de recensement des problèmes et d'identification des solutions connues réalisées préalablement dans Lambda.

## 5. CONVERGENCE ENTRE STANDARDS ET OUTILS

L'interopérabilité entre les modèles réalisés dans le projet est assurée par l'utilisation conjointe de différents standards d'ingénierie : SysML, MARTE, AADL, SystemC et IP-XACT. Ces standards pour la conception de systèmes embarqués ont émergé dans le contexte de différentes communautés OMG [12], SAE [13], OSCI [14], SPIRIT [15] dotées de leurs propres pratiques et vocabulaires. Ils ne sont pas aujourd'hui entièrement alignés. Il est à noter par ailleurs que l'adoption de ces récents standards et leur implémentation dans des outils du marché rencontre une certaine inertie. Le tableau ci-dessous propose un panorama des standards implantés dans des outils commerciaux.

Standard	Date adoption	Date implantation	Solutions commerciales (COTS, OSS)
UML 2	2003	2005	15
SysML	2006	2006	8
MARTE	2007	2009	2
AADL v1	2004	2007	1
SystemC-TLM2	2008	4 2008	10
IP-XACT	2006	2006	29
Sources: OMG UML/SysML vendor directory, vendor web sites			

Tableau 1: Panorama des standards d'ingénierie en juin 2009

L'adoption d'un standard dans une communauté nécessite une étroite collaboration entre utilisateurs et vendeurs d'outils (par exemple, dans le cas de l'Electronic System Level design – ESL – avec SystemC et IP-XACT). Suivant cet exemple, plusieurs partenaires industriels et vendeurs d'outils du consortium Lambda ont défini un plan de travail permettant d'adresser les problématiques : 1) de convergence des standards pour traiter l'hétérogénéité des langages et permettre l'utilisation conjointe de langages dédiés à différents domaines, 2) de convergence des outils pour une meilleure prise en compte des standards et donc de l'amélioration de leur interopérabilité afin de rendre possible l'utilisation conjointe de plusieurs outils dans un processus système.

Le sous-ensemble de SysML et MARTE utilisé ans les activités de modélisation, joue un rôle central dans ces activités de standardisation. Il s'agit pour des vendeurs présents dans le consortium (tels que Esterel Technologies ou CoFluent Design) d'ouvrir leur outil sur SysML/MARTE, et pour l'ensemble des partenaires d'assurer une cohérence et une complémentarité avec les standards AADL, SystemC et IP-XACT dans le contexte d'actions de convergence dans différents organismes de standardisation.

Les travaux du consortium ont déjà permis la finalisation du standard MARTE 1.0 à l'OMG, l'élaboration de règles de correspondance entre MARTE et AADL (reconnus par les communautés OMG et SAE), l'amélioration du support pour l'expression de grandeurs physiques dans SysML1.2, ainsi que la rédaction d'une réponse commune Thales, Airbus, CoFluent, INRIA, Adacore à la RFI "Future of UML" publiée par l'OMG, mettant en avant une vision commune pour la conception de systèmes embarqués.

Les projets de recherche comme Lambda constituent de bons environnements pour l'élaboration de standards ou leur évolution. Ils nécessitent une implication des utilisateurs et des vendeurs d'outils pour assurer une large adoption des travaux proposés par le consortium. Les actions de standardisation étant des efforts à long terme (environ trois ans pour la définition d'un nouveau standard OMG, deux ans supplémentaires pour la commercialisation d'implémentations), il est cependant nécessaire de définir une stratégie coordonnée pour gérer la différence de rythme et de cycle de vie entre projets et standards.

## 6. CONCLUSIONS

Le travail en cours dans le projet Lambda démontre l'importance de la prise en compte des plateformes d'exécution embarquées dans le processus de conception système, par l'intermédiaire des bibliothèques de modèles réalisées. Ces modèles de plateforme implémentés dans les outils mis en œuvre par le consortium ouvrent des perspectives de nouvelles offres d'environnement permettant à des intégrateurs, fournisseurs de fonctions et systémiers, de développer, valider et certifier les applications avec une productivité accrue. L'approche mise en œuvre dans le projet est bénéfique pour les industriels, fournisseurs de plateforme et vendeurs d'outils. L'utilisation conjointe de SysML et d'un sous-ensemble de MARTE fournit un support adéquat pour la capture des besoins de l'application (dérivés des exigences) et des capacités de la plate-forme, et des liens d'allocation établissant des contrats d'utilisation de ressource entre éléments de l'application et éléments de la plate-forme. Les expérimentations réalisées autour de MARTE mettent toutes fois en évidence le besoin d'un support méthodologique adéquat pour prendre en main le langage. Après une première phase d'apprentissage, des pratiques communes sont cependant apparues autour d'un sous-ensemble limité de MARTE (Non-Functional Properties, Time and Resource models).

Le projet Lambda vise à étendre le champ d'application du MDE dans le domaine de l'industrie de haute technologie. C'est dans ce contexte que plusieurs études autour de l'intégration et de l'interopérabilité (MCO des ateliers de modélisation, passage à l'échelle des outils) ont été lancées pour étudier les principaux obstacles au déploiement à large échelle d'outils MDE dans l'industrie.

Enfin, les interactions et la fertilisation croisée entre les expérimentations de modélisation et les activités de standardisation ont contribué à la convergence des outils et des standards dans le domaine des systèmes embarqués, dans lequel SysML et MARTE jouent un rôle central.

Alors que le projet Lambda entre dans sa dernière année, les actions de dissémination et de standardisation dans la communauté des systèmes embarqués vont s'amplifier, avec pour objectif de permettre une meilleure visibilité sur les résultats techniques obtenus.

## 7. REFERENCES

- [1] Ministère de l'Industrie, Syntec et RNTL, EmbeddedTouch.com ©2007 - VersionSIEP:1.2.0
- [2] Projet System@tic Usine Logicielle, <http://www.usine-logicelle.org>
- [3] Projet TOPCASED, <http://www.topcased.org>
- [4] OMG Systems Modeling Language (SysML) web site, [www.omgsysml.org](http://www.omgsysml.org)

- [5] OMG MARTE web site, [www.omgmarTE.org](http://www.omgmarTE.org)
- [6] SAE Standard, “Architecture Analysis and Design Language” (AADL), AS5506 A, January 2009
- [7] IP-XACT, IEEE standard 1685-2009, ISBN 978-0-7381-6160-0
- [8] M. González Harbour and J.C. Palencia, “Response Time Analysis for Tasks Scheduled under EDF within Fixed Priorities”, Proceedings of the 24th IEEE Real-Time Systems Symposium, Cancun, México, December, 2003.
- [9] IEEE 1666 Standard SystemC Language Reference Manual, <http://standards.ieee.org/getieee/1666/>
- [10] Modeling and Analysis Suite for Real-Time Applications, <http://mast.unican.es/>
- [11] CoFluent Design, <http://www.cofluentdesign.com>
- [12] Object Management Group, <http://www.omg.org>
- [13] Society of Automotive Engineers, <http://www.sae.org/>
- [14] Open SystemC Initiative, <http://www.systemc.org/home/>
- [15] SPIRIT Consortium, <http://www.spiritconsortium.org>