

# Simulation des systèmes cyber-physiques

## Un panorama : historique, pratique actuelle et points de vue

MICHEL NAKHLÉ, PHILIPPE BAUFRETON, BRUNO DARBOUX ET BRUNO MONSUEZ

### AVANT-PROPOS

Le présent article a pour seul objectif de fournir un panorama de la simulation des systèmes cyber-physiques. Il repose sur les exposés et discussions, sous une forme rédigée et enrichie, intervenus lors de la table ronde intitulée « Simuler un système complet : Graal ou réalité » qui s'est déroulée lors des « Assises de l'Embarqué 2014 » tenue le 24 novembre 2014 sous la conduite de Michel Nakhlé (CSSI), avec la participation de Bruno Darboux (Airbus), Bruno Monsuez (ENSTA ParisTech), Philippe Baufreton (Sagem Défense-Sécurité) et le témoignage de Éric Bantegnie, Président de l'association Embedded France. Ce panorama comprend les trois parties suivantes :

- Partie 1 : Introduction (terminologie, représentations utilisées pour modéliser les systèmes, problèmes induits par les développements technologiques et couplages et normes d'échanges)
- Partie 2 : Restitution du déroulement de la table ronde, avec des encadrés dédiés à des thèmes évoqués lors de la discussion.
- Partie 3 : Bibliographie.

L'article est complété par deux témoignages d'utilisateurs présentés chacun sous la forme d'un court article faisant suite au présent article, respectivement :

- « *L'atelier de génie système AGE SYS* » par Philippe Baufreton, Jean-Claude Derrien et Marc Malot de la société Safran.

- « *Interopérabilité d'une simulation fonctionnelle et d'une simulation 3D dans l'avion* » par Hélène Moutier et Alain Houtekier de la société Airbus.

### ■ PARTIE 1

#### 1. INTRODUCTION

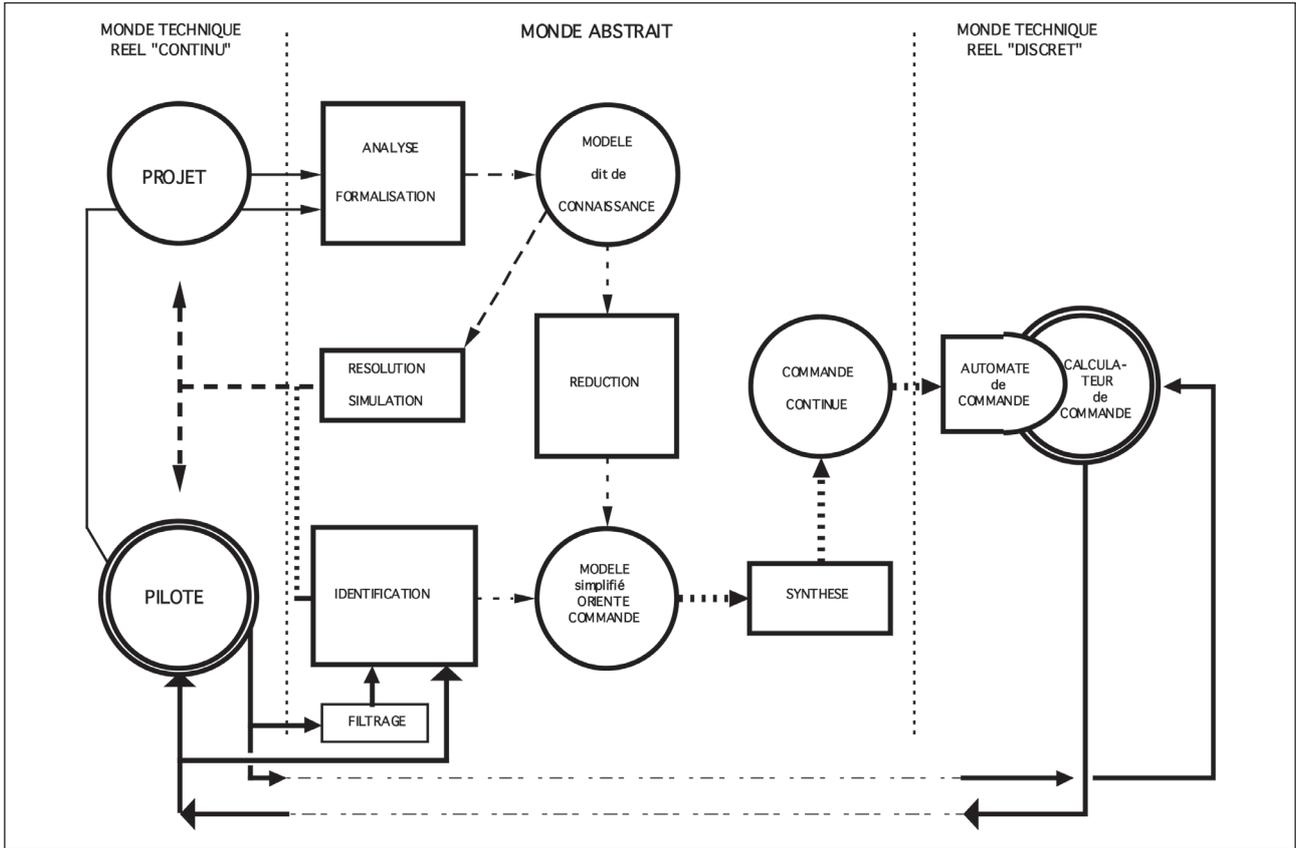
Pour rappel, la première simulation numérique « civile » en physique théorique fût l'expérience de Fermi-Pasta-Ulam (1953). Depuis, la simulation numérique a évolué parallèlement à l'informatique.

#### ► 1.1 Terminologie

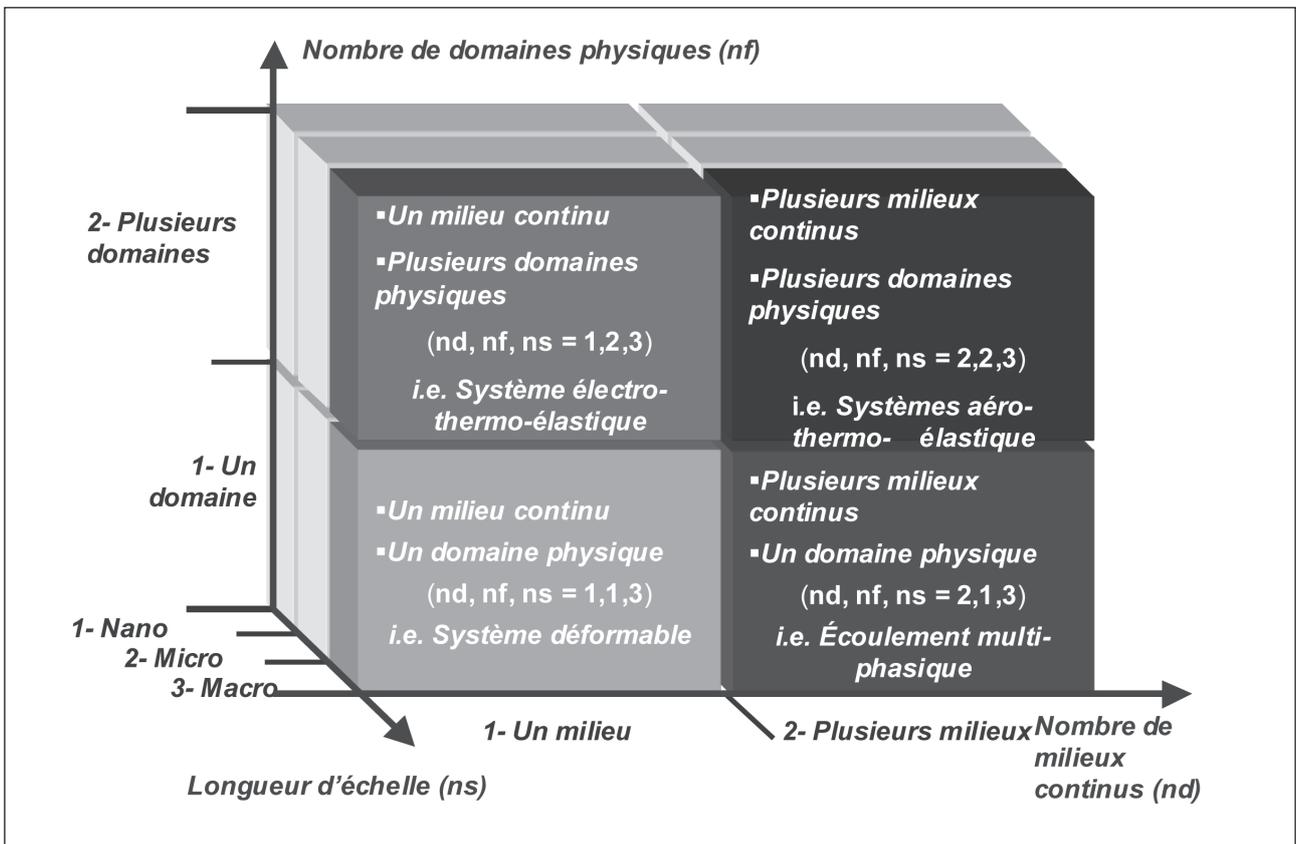
- *Système ubiquitaire* : accessible de n'importe où
- *Système mobile* : intègre les terminaux mobiles
- *Système « context-aware »* : prend en compte le contexte d'exécution
- *Système pervasif* : associe ubiquité, mobilité et context-awareness. On introduit la gestion de la dynamique d'architecture directement dans le cycle de développement, et on passe des approches déclaratives (ADL) vers une programmation orientée architectures, ce qui ouvre la voie à des systèmes réactifs modifiant leur architecture pour fonctionner et accorder leurs fonctionnalités en fonction de leur contexte. Ainsi, s'il n'est plus envisageable de concevoir l'architecture d'un système pervasif de façon exhaustive, il sera cependant possible de définir les règles d'adaptation qui vont le construire de manière opportuniste ([FF12]).
- *Système ambiant* : intégré dans les objets quotidiens
- *Système hybride* : continu et discret...
- La Modélisation/Simulation<sup>1</sup> des systèmes et/processus peut être vue sous trois angles complémentaires :

1. On peut vouloir s'intéresser à une combinaison de phénomènes physiques dans des espaces prévus à cet effet pour obtenir un *système technique* de fonction précise ; cette approche illustre et permet l'utilisation croisée de connaissances théoriques et déterministes, acquises séparément, en vue de la réalisation des systèmes techniques et de leur commande associée (voir Figure 1).
2. On peut vouloir étudier un *système physique*, sujet à perturbation et s'intéresser alors au déroulement naturel des phénomènes *pour la longueur d'échelle, les nombres de milieux continus ou de domaines physiques* (voir la Figure 2).
3. La réalité n'est jamais « parfaite » ou plutôt jamais telle qu'on la croit quand on la mesure. On est alors amené à faire des approximations ou des simplifications et à composer avec le réel par appréciation locale. Dans ce cas, la modélisation/simulation peut être vue sous l'angle

<sup>1</sup> La modélisation/simulation traite également les données structurées ou non (Big Data ou DataMasse) avec l'arsenal des statistiques... Elle ne fait pas l'objet du présent exposé.



▲ Figure 1 : Méthodes, outils et supports aux systèmes techniques ([MN92], [MN93], [FF95])



▲ Figure 2 : Modélisation des couplages multi-physiques et multi-échelles ([MN09])

de « l'approximation », un filtrage de la réalité ([MN95], [MN07a]), avec en plus l'analyse de la confiance à accorder aux modèles : incertitudes (voir les acquis des projets EHPOC et CSDL, relatifs aux incertitudes), fiabilité dynamique qui envisage l'évolution aléatoire au cours du temps du système, modélisée par un processus stochastique pour l'étude de sa sûreté de fonctionnement (SdF)...

Il est bien entendu que l'on doit pouvoir conjuguer de façon orthogonale les « démarches » 1 et 3 ([MN92a], [MN85], [MN95]), ainsi que les « démarches » 2 et 3 ([HB08], [MN95], [MN96]).

- La *simulation cyber-physique (SCP)* a pour objectif de simuler la physique à la même échelle que le niveau nécessaire (adaptabilité) afin de concevoir et optimiser la partie embarquée hybride (continue et discrète), dans son environnement<sup>2</sup>. D'où, aussi, l'expression « ingénierie logicielle des systèmes distribués adaptatifs » qui sous-entend une adaptation des outils de modélisation et de conception de systèmes pour une exploitation efficace à l'exécution<sup>3</sup> ([EP12]).
- Pour désigner les systèmes d'information adaptables, dans leur totalité, les anglo-saxons utilisent aussi « DDAS », pour « Distributed Dynamically Adaptive Systems ».

## ► 1.2 Fondements, représentations, formalismes et outils ([CSC86], [TIO84])

La simulation consiste donc à exécuter symboliquement un modèle selon un ou plusieurs scénarios ; elle repose sur une sémantique opérationnelle permettant d'évaluer, de manière déterministe, le comportement décrit par un modèle en réaction à des stimuli d'entrée. La confiance que l'on peut accorder aux résultats de simulation repose sur l'expérience et l'expertise des utilisateurs leur permettant d'apprécier quantitativement et qualitativement les différents scénarios de simulation vis-à-vis, d'une part, des besoins exprimés (choix des scénarios, taux de couverture, interprétation des résultats, définition d'intervalles de confiance, etc.) et, d'autre part, des sémantiques opérationnelles utilisées pour exécuter symboliquement les modèles.

### 1.2.1 Modélisation et simulation des systèmes physiques

Les modèles non-linéaires nécessaires à l'étude de certains phénomènes demandent une résolution par des méthodes numériques poussées afin de capturer l'intégralité des particularités physiques de la solution, comme les ondes de choc, les zones de rupture d'un matériau... Ce sont ces types de phénomènes complexes qui peuvent nous intéresser dans la simulation des SCP.

Les outils adaptés pour résoudre ces phénomènes se recrutent parmi des environnements offerts par des éditeurs (ABAQUS, ANSYS, MSC, LMS, NASTRAN, SAMCEF...), développés par des centres de recherche, tel que elsA, pour l'aérodynamique (ONERA) ou communautés de logiciel libre tels que code\_ASTER, SATURNE..., dont certains ont bénéficié d'améliorations substantielles dans le cadre des « projets collaboratifs » RNTL ou FUI.

La modélisation/simulation, mobilise plutôt, dans ce cas, des représentations du type équations aux dérivées partielles ([MN91], [MN96], [HB08], [JD07a], [JD07b], [JD08]).

### 1.2.2 Formalismes associés aux systèmes techniques

Les logiciels de « simulation hybride » se sont développés depuis les années 1970, initialement pour traiter des problèmes particuliers : physique nucléaire, circuits électroniques, circuits électriques... Aujourd'hui, ils sont passés du domaine de la recherche aux applications industrielles, afin de simuler des systèmes généraux, et sont en évolution constante.

Pour leur codification, nous retenons celle faite en 2000 par D.A. van Beek, J.E. Rooda ([DVB00]) pour distinguer les différents types de simulation continue, discrète ou hybride : « CT, DE, CT/DE ».

La modélisation/simulation mobilise pour la partie continue « CT », des représentations de type :

- Équations différentielles, ou EDO : la plupart des solveurs du marché
- Équations algèbro-différentielles (EAD) implicites<sup>4</sup> ([MN78], [MN79a], [MN90], [MN92a], [EL92], [MN93]...).

Pour simplifier le discours, la distinction EDO/EAD sera abandonnée dans la suite de l'exposé.

Les formalismes des SED, « DE », sont multiples. On peut les classer en trois catégories (logique, processus/algébrique, ensembliste). Ces formalismes permettent de décrire le comportement (ou les performances, avec une composante temporelle) ; la modélisation est complexe et elle le devient encore plus (lorsque le temps s'invite) :

- Logique :
  - TL, « Temporal Logic » ([ZN92]) or TTL « Timed Temporal Logic » ([RK90])
- Algébrique / Processus :
  - CCS, « Calculus of Communication System » ([RM89]) ou « Min-Max Algebra » ([RC79])
  - CSP, « Communication Sequential Process » ([CH85]) ou GSMP, « Generalised semi-Markov Process » ([PG89])

2 Selon NSF, « Cyber-physical systems will transform how we interact with the physical world just like the Internet transformed how we interact with one another ». L'intérêt croissant des CPS résulte du besoin crucial des industriels, tous secteurs, de répondre à des défis en science et en ingénierie des systèmes complexes : NSF a investi depuis 2008 plus de 250 M\$ afin de soutenir la recherche autour du socle technologique commun ; en Europe, ARTEMIS constitue une initiative équivalente.

3 Voir à cet effet, les travaux en cours à OMG, « SysML Extension for Dynamic Simulators » : [http://www.omgwiki.org/OMGSysML/doku.php?id=sysml-dynamic-simulation:sysml\\_extension\\_for\\_dynamic\\_simulators](http://www.omgwiki.org/OMGSysML/doku.php?id=sysml-dynamic-simulation:sysml_extension_for_dynamic_simulators)

4 Cette description est a-causale, la causalité étant effectuée par ordonnancement automatique (ou semi-automatique, si préférences partiellement indiquées par l'utilisateur) avant la génération de code du simulateur.

- Ensembliste :
  - Automata ([ZK78]) ou Timed Automata ([GN93])
  - FSM, « Finite State Machine » ([AG62]) ou « Timed FSM » ([AG62])
  - PN, « Petri Net » ([JP81]) ou « Timed Petri Net » ([MH87])
  - DEVS, « Discrete Event System Specification » ([BZ84a], [BZ84b]).

**1.2.3 Outils pour les systèmes techniques**

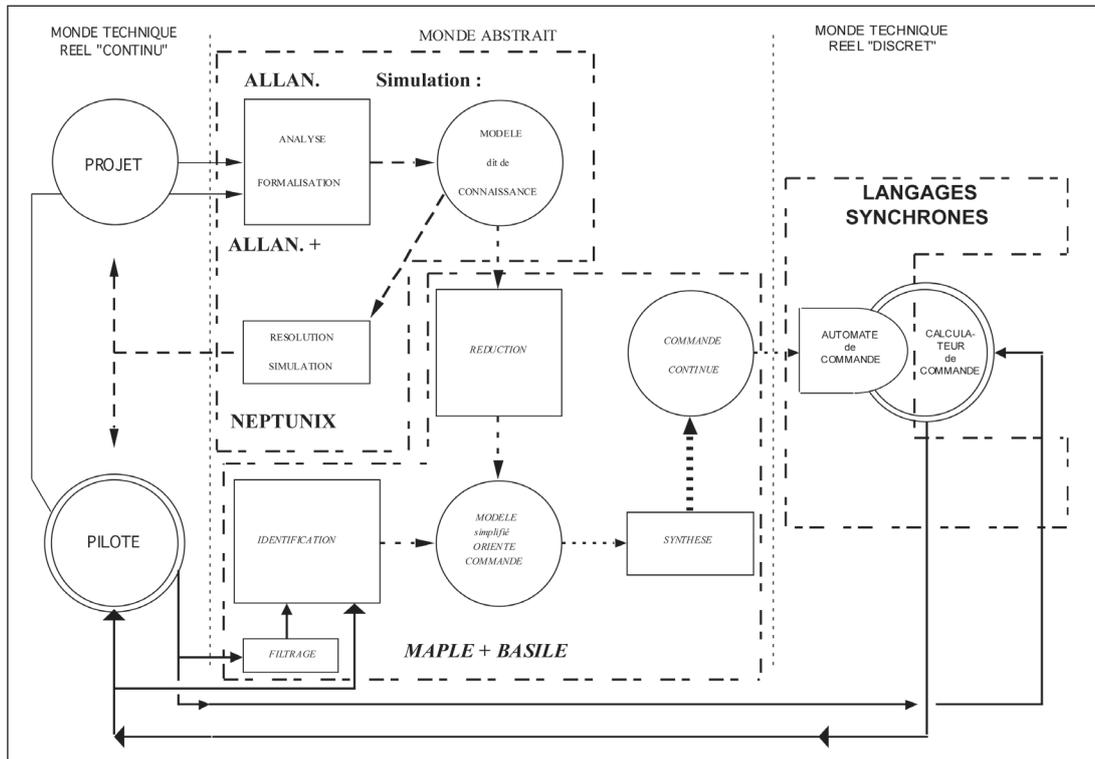
Nous donnons ci-après une liste non exhaustive des outils de simulation dynamique.

- Systèmes techniques continus « CT, CT+ » :
  - Fondés sur des représentations algèbro-différentielles : NEPTUNIX ([MN79a]...), avec le modelleur ALLAN<sup>TM5</sup> du type « boîtes et ficelles » ([MN92a]) ou sous forme de blocs structurés ([ABC99]) ; MATLAB/SIMULINK, SCICOS/SCILAB ...
  - Fondés sur des formalismes de type Graphes de Liaisons : SCRIBT/NEPTUNIX ([MN90]), AMESIM, HyBrSim, 20-SIM ([JB99]), PLUS-M ([AC86])...
  - À objets {tel que le langage MODELICA et son outil DYMOLA ([JB99])}...
- SED, « DE » : Nous citons d'abord les outils dédiés au GRAFCET et aux Réseaux de Petri, puis nous classons les autres selon la formalisation de leur sémantique opérationnelle :
  - Formalisme STATECHARTS ([DH87]) : STATEMATE, CONTROLBUILD, CPNTOL, SCADE, ESTEREL STUDIO...

- Langages synchrones ([AB91], [ECC91], [NH93], [AB99]) : SIGNAL ([PLG91a], [PLG91b]), LUSTRE ([NH91]), ESTEREL ([FB91]), SynDEx ([CL89], [CL91])...
- BIP<sup>6</sup> (Behaviour, Interaction, Priority), développé par Joseph Sifakis, dont le formalisme est basé composant (*prometteur !*).
- Systèmes techniques hybrides, « CT/DE » : ELACCS ([MN93], [FF95]), fondé sur des formalismes multiples et passerelles vers divers outils, dont les langages synchrones SIGNAL et SynDEx (voir Figure 3) ; PTOLEMY ([CPE14])...

**1.3 Problèmes induits par les développements technologiques**

Pour introduire les besoins actuels en développement technologique dans ce domaine, qui depuis ont profondément évolué, nous faisons référence au Rapport de prospective 2014 de l'Institut des Sciences de l'Ingénierie et des Systèmes, INSIS, du CNRS<sup>7</sup> : « Il s'agit aujourd'hui non seulement de faire progresser les technologies et de contribuer aux innovations futures, mais aussi d'apporter des éléments de réponse aux problèmes globaux induits par les développements technologiques eux-mêmes. Ainsi, les questions d'énergie, de transport et de communication sont devenues indissociables de leur impact environnemental. De même, la sécurité est maintenant une exigence sociale incontournable et omniprésente ». Ce qui *de facto* induit de la complexité dans la complexité.



◀ Figure 3 : ELACCS ([MN93], [FF95])

5 ALLAN. est une marque déposée par Gaz de France.  
 6 <http://www-verimag.imag.fr/Rigorous-Design-of-Component-Based.html?lang=fr>  
 7 [http://www.cnrs.fr/comitenational/doc/rapport/2014/Rapport\\_de\\_prospective\\_CS\\_INSIS\\_2014.pdf](http://www.cnrs.fr/comitenational/doc/rapport/2014/Rapport_de_prospective_CS_INSIS_2014.pdf)

## ► 1.4 Couplage et normes d'échanges

### 1.4.1 Couplage de codes de simulation multi-physiques ([JD07a], [JD08], [MN09]...)

Aux États-Unis, au début du siècle, des approches de couplage par « composants » ont été expérimentées :

- CCM (COBRA Component Model)
- CCA (Common Component Architecture), porté par Component Technology for Tera-scale Simulation Software...

En France :

- Le 1<sup>er</sup> projet collaboratif ayant abordé ce problème est le projet RNTL SALOMÉ. Depuis, la plate-forme SALOMÉ<sup>8</sup> s'est beaucoup enrichie avec les expériences des projets System@tic<sup>9</sup> « Haute Performance pour l'optimisation et la conception, HPOC » (IOLS, EHPOC, OPENHPC, ILMAB...); son modèle MED d'échange de données aussi !
- Autre environnement, porté par le CERFACS : O-PALM<sup>10</sup>.

D'autres travaux de recherche autour de modélisations et calculs alternatifs plus économes en puissance de calcul existent également. Ces travaux concernent les modèles réduits, l'adaptation de maillage... : sous certaines conditions, ces solutions alternatives permettent de repenser les algorithmes utilisés par les applications industrielles (voir les acquis des projets EHPOC et CSDL, relatifs aux méthodes de réduction, le séminaire « *La réduction de modèles et ses applications en ingénierie* » du 8 avril 2011, animé par le Professeur Ch. Farhat de l'Université de Stanford et organisé par Ter@tec, CSSI & System@tic, et plus généralement, consulter régulièrement les sites de Ter@tec<sup>11</sup>, Aristote<sup>12</sup>...).

### 1.4.2 Normes d'échanges de modèles techniques et de co-simulation

Certaines filières industrielles utilisent des normes d'échange entre équipementiers et systémiers ; nous citons pour l'exemple AUTOSAR pour l'industrie automobile européenne... Toutefois, dans notre exposé, nous retenons, pour les systèmes techniques, la norme indépendante d'outils FMI<sup>13</sup> pour soutenir l'échange de modèles et la co-simulation des modèles dynamiques ; elle utilise une combinaison de dossiers XML et de code C compilé. FMI fournit un ensemble de fonctions standard aux données d'échange entre les sous-systèmes et les synchronise dans des étapes de communication. Ces sous-systèmes s'appellent « esclaves FMI », alors que le coordonnateur de co-simulation s'appelle « maître FMI ». Des modèles conformes à FMI constituent des unités fonctionnelles de maquette (FMU).

## ■ PARTIE 2

### LA TABLE RONDE « SIMULER UN SYSTÈME COMPLET : GRAAL OU RÉALITÉ »

Animée par Michel Nakhlé, cette table ronde a réuni les intervenants suivants :

- Bruno Darboux, Vice-Président Systems General Engineering à Airbus, par message texte et vidéo
- Bruno Monsuez : Professeur & Directeur de l'Unité Informatique et Ingénierie des Systèmes à ENSTA ParisTech
- Philippe Baufreton : Expert Senior en Embarqué Critique ; Responsable Prospective Logiciels embarqués et architectures pour Safran Electronics

et a recueilli le témoignage d'Éric Bantegnie, Président de Embedded France et Chef de file du plan Nouvelle France Industrielle logiciels et systèmes embarqués.

Le but était, après un rappel du passé, de débattre des besoins du futur proche des nouveaux systèmes, en particulier dans les domaines de l'avionique et des robots collaboratifs, des besoins en matière de sûreté de fonctionnement des systèmes ainsi que ceux concernant l'enseignement technique et scientifique. Ce qui suit résume les débats à propos des différents sujets abordés, chacun ayant été accompagné de la projection d'une vue synthétique

Au titre final de la table ronde, un peu « racoleur », notre préférence penche plutôt pour le titre initial « *simulation des systèmes cyber-physiques* », avec pour objectif de conjuguer, en ingénierie système (IS), différentes techniques qui concourent à rendre les « systèmes cyber-physiques » sûrs de fonctionnement : conception architecturale et gabarits de composants & d'interfaces, modélisation et simulation (hybride, co-simulation, HPC), qualité de services, méthodes formelles et semi-analytiques d'analyse de défaillance (équations différentielles stochastiques, réseaux de Petri stochastiques....

<sup>8</sup> <http://www.systematic-paris-region.org/fr>

<sup>9</sup> <http://www.systematic-paris-region.org/fr>

<sup>10</sup> [http://www.cerfacs.fr/globc/PALM\\_WEB/EN/OVERVIEW/index.html](http://www.cerfacs.fr/globc/PALM_WEB/EN/OVERVIEW/index.html)

<sup>11</sup> <http://www.teratec.eu/actu/Agenda.html>

<sup>12</sup> <http://www.association-aristote.fr/doku.php/public:seminaires:seminaire-2015-02-05>

<sup>13</sup> <https://www.fmi-standard.org/start>

## ► 2-1 Le passé

### *Vue introductive au passé*

**Domaines : « Nucléaire Civil », « Robotique »**

**CEA : 3 décennies R&D → .... Challenges :**

- Simulation sur ordinateur hybride d'abord, puis sur ordinateurs numériques des différents composants
- « Codes de calcul » opposé à « simulation hybride (continu & discret) ».

**Synthèse :**

- Beaucoup d'allers-retours entre les représentations
- Échanges avec les acteurs externes (EDF, FRA...) +/-

**Extrants logiciels :**

- NEPTUNIX, puis 1er simulateur d'entraînement (REPSI) à destination des élèves de Génie Atomique
- AMESIM

**Pot commun (INRIA) : BLAISE → BASILE → Scilab ; MODULEF.**

**Sociétés créées (Essaimage/privé :**

- CORYS → CORYS TESS
- IMAGINE → LMS → Siemens PLM Software
- SHERPA ENGINEERING...

> Depuis changement de contexte...

### *Commentaires de l'animateur*

- Ayant modestement apporté quelques pierres à cette construction, ci-après un bref témoignage (voir également les encadrés 2.1 et 2.2) :
  - Modélisation : Simulation numérique des systèmes hybrides (continus et discrets), avec leur commande, afin de bien cerner les 3C « Calcul informatique, Communication, Contrôle » et contrôler les échanges énergétiques
  - Pré-traitement : Dérivation formelle et calcul symbolique, pour s'abstraire de ce qui est automatisable et sans rentrer dans les détails ; détection précoce de la dégénérescence numérique ; génération automatique de code portable...
- À l'époque, comme Monsieur Jourdain qui faisait de la prose sans le savoir, nos équipes ont jeté les bases des systèmes cyber-physiques.
  - Langages synchrones, dans C2A, avant adoption par le marché
  - UML, SYSML, avec OMG
  - AADL, avec SAE
  - Ingénierie Système, avec INCOSE, AFIS...
- Et plusieurs initiatives (voir également « l'encadré 3 » et « les encadrés 4, 4.1, 4.2, 4.3 », se focalisant sur trois projets collaboratifs dans le domaine de l'embarqué) :
  - Le soutien public a été et est très précieux pour la recherche collaborative : réseaux technologiques (RNTL...), FUI, FSN... sans oublier ANR et les autres sources de financement..., avec un rôle accru, dévolu aux Pôles de Compétitivité.
- Par « changement de contexte », nous pensons à l'émergence de plusieurs formalismes :

## ► 2-2 Le futur proche

### *Vue introductive au futur proche*

#### Technologie et domaines

- Tendances technologiques, en ingénierie système (IS) : « Calcul informatique, Communication, Contrôle » Méthodes formelles. Modèles informatiques (de connaissances) ou Réduction de modèles (de représentation). Gros volumes de données, en relation avec Radiofréquences et sans-fil...
- Domaines d'application : Réseaux électriques, Bâtiments intelligents, Robots coopératifs, Avionique, Automobile...

#### Contexte

- Projets en cours : AGeSYS (System@tic), CONNEXION (FSN/BGLE), DEPARTS (FSN/BGLE), CERCLES2 (ANR), U3CAT...

#### Deux volets

- Enseignement technique et scientifique ?
- Sécurité de fonctionnement & méthodes formelles

#### *Commentaires des participants à la table ronde*

- L'animateur introduit les Thématiques & Projets, dans l'ordre des dépôts au BGLE : mention spéciale pour CONNEXION<sup>1</sup> qui répond à un besoin de bien structurer la filière, pour aller de l'avant et qui sera présenté juste après la table ronde par Catherine Devic : DEPARTS<sup>2</sup> dont l'horizon est plutôt moyen terme ; peut-être un point d'étape aux prochaines assises, quand nous serons à mi-parcours.

- Philippe Baufreton prend la parole afin de recentrer le débat autour des 3C (Calcul informatique, Communication et Contrôle) et introduit le discours relatif à AGeSYS<sup>3</sup> du pôle System@tic en 1<sup>er</sup>, car couvre l'Ingénierie Système, puis présente les avancées des projets CERCLES2<sup>4</sup> et U3CAT<sup>5</sup> qui concernent le niveau bas du cycle en V du logiciel.
- Bruno Monsuez insiste sur le fait qu'il existe un réel besoin de formation tant qu'aux aspects non disciplinaires que pluridisciplinaires.

14 Le projet CONNEXION (PIA/BGLE2) a pour objectif principal de proposer des principes de conception d'un contrôle-commande sûr et performant, acceptable par tous les pays, et permettant de développer une gamme de solutions compatibles export/rénovation. Il propose de mettre au point des méthodes et des outils d'ingénierie performants, assis sur une crédibilité scientifique forte, afin de garantir la clarté de la démonstration de sécurité des systèmes qui seront proposés.

15 Le projet DEPARTS (PIA/BGLE3) a pour but d'offrir un ensemble au meilleur niveau technologique, de méthodes, d'outils et de produits permettant la conception de systèmes embarqués et de contrôle-commande critiques, pour les secteurs industriels de l'automobile, l'aéronautique, le ferroviaire, le spatial et les processus industriels, garantissant une haute disponibilité et un niveau de sécurité maximal (SIL4 - F1A). Pour ailleurs, la vérification formelle, complément indispensable à la modélisation/simulation dynamique des CPS, a déjà fait objet de la session « Contribution à une intégration des techniques de vérification formelles dans les processus industriels de développement logiciel » de la Conférence NEPTUNE2014. Y sont dévoilés les « grands principes : modélisation UML, modélisation B, transformation puis vérification formelle » de la brique BVF, dont l'industrialisation est en cours par les partenaires du Projet PIA/BGLE3 DEPARTS, piloté par CSSI (voir N° 109 de juin 2014 de la revue Génie Logiciel).

16 AGeSYS, Atelier de Génie SYStème est un ensemble complet d'outils intégrés pour une conception « orientée modèles » de systèmes et logiciels embarqués, permettant d'assurer la cohérence entre description système et description logicielle et d'industrialiser le processus d'ingénierie avec une définition claire des transitions entre système, logiciel et matériel. Il apporte en particulier un excellent couplage entre la modélisation système et la modélisation multi-physique. AGeSYS constitue une réelle avancée technologique validée par les utilisateurs industriels et met en œuvre un nouveau modèle économique s'appuyant en grande partie sur des composants « open source ». Cet atelier a été développé dans le cadre d'un projet collaboratif de recherche et développement porté par Esterel Technologies, avec les fournisseurs de technologies LMS, Scaleo Chip, Scilab Entreprises et le CEA, les utilisateurs Continental, PSA, Renault, Valéo (automobile), Airbus, Snecma DS, Sagem, Thales (aéronautique), Alstom Transport, Atos, Thales (ferroviaire) et les pôles de compétitivité Aerospace Valley (Midi-Pyrénées et Aquitaine) et System@tic (Paris Île-de-France). Le projet AGeSYS a reçu le soutien de l'État dans le cadre du Programme d'Investissements d'Avenir.

17 <http://www.algo-prog.info/cercles/web/index.php?id=cercles:accueil>. L'objectif de CERCLES2 est de capitaliser la certification des composants logiciels par l'intermédiaire de composants pré-certifiés. En conséquence, le problème à résoudre est celui de l'existence de méthodes et outils d'assemblages peu coûteux et industrialisables permettant de construire l'architecture du logiciel final en induisant sa certification.

18 <http://frama-c.com/u3cat/>. Le projet U3CAT avait pour but principal de fournir un ensemble d'outils théoriques (modèles mémoires, techniques d'analyse) et pratiques (implantations logicielles) permettant de garantir formellement certaines propriétés de programmes C et du code exécutable correspondant.

## ► 2-3 Réponse au besoin de l'équipementier : Sagem Avionique, Défense Sécurité

### ***Vue introductive au besoin de l'équipementier Sagem Avionique Défense sécurité***

#### **Maîtriser la complexité des Systèmes**

- Silos, Processus d'intégration, Interdépendance.

#### **Système complexe**

- Multi-vues & Multi-abstractions
- Modélisation, Simulation et Validation
- Cycle de vie du produit

#### **« Eco-système complexe »**

- Multi-métiers, Multi-Outils, Certification

#### **Les approches mises en œuvre**

- Prévention (Démarche systémique de l'amont au produit final, conception modulaire / contrats)
- Détection
- Tolérance aux fautes (produit complet / environnement)

#### ***Commentaires de Philippe Baufreton***

- Les systèmes embarqués sont partout. Dans l'aéronautique, l'automobile, le transport ferroviaire, ils réalisent des fonctions critiques ayant un impact direct sur la sécurité des passagers. La conception de ces systèmes, dont on attend un fonctionnement sans faille, est un processus particulièrement complexe.
- Les systèmes développés par Safran sont de plus en plus complexes, tant par leur niveau technologique que par la pluridisciplinarité des compétences mises en œuvre. L'Atelier de Génie Système (AGS) doit donc répondre à cette complexité pour permettre aux équipes projet de concevoir et développer de tels systèmes. L'analyse du système et l'utilisation de la modélisation sont deux leviers de performance qui participent à ce principe.
- L'ingénierie système a précisément pour objectif de traiter la complexité des systèmes et amener de la valeur aux systèmes, aux parties prenantes et aux sociétés. Pour ce faire elle s'appuie sur des méthodes d'analyse permettant de décomposer un problème complexe en un ensemble de problèmes appréhendables en collaboration avec des équipes pluridisciplinaires. Ces méthodes sont dites itératives et récursives, au sens où l'ensemble des processus et méthodes proposées pour analyser et développer un système est utilisable pour analyser et développer les sous-systèmes (les données de sortie des processus au niveau système sont les données d'entrée du processus au niveau sous-système).
- Les méthodes d'analyse du système permettent également de représenter le système selon différents points de vue – en particulier les visions opérationnelle, fonctionnelle et organique. Cette approche par points de vue est un élément clé de l'AGS.

- Pour permettre l'analyse du système, et pour implémenter l'approche par points de vue, l'AGS s'appuie sur les techniques de Model-Based System Engineering (MBSE), non pas en concurrence mais en complément des éléments textuels (langage naturel structuré).
- Les standards aéronautiques sont fondamentalement orientés exigences (Requirement-Based Engineering – RBE), mais cela ne doit pas signifier que toutes les exigences soient textuelles. L'un des objectifs de l'AGS est de permettre d'utiliser les formats de description les plus efficaces pour chaque élément décrit ou spécifié. L'exigence est avant tout un vecteur de communication : son format doit donc tenir compte de l'effort nécessaire à sa compréhension et du besoin de non ambiguïté, voire parfois de formalisme (au sens langage formel).
- La modélisation doit également permettre d'améliorer la pertinence des analyses du système en prenant en compte l'ensemble des points de vue, un par un (approche par points de vue) ou fusionnés (modélisation multi-physique, modélisation des performances).
- Référentiel méthodologique

Le référentiel méthodologique de l'AGS décrit de façon claire et non ambiguë les processus (activités à réaliser) et propose des méthodes (comment réaliser les activités). Il enrichit les règles (devant être vérifiées et nécessaires à la conformité du produit) et les bonnes pratiques (qui permettent de capitaliser le savoir-faire) afin d'éviter l'introduction d'erreurs ou d'oublis dans le développement. Le référentiel méthodologique doit également permettre aux utilisateurs des projets de connaître les activités qui sont nécessaires vis-à-vis du niveau de certification requis (typiquement les niveaux de DAL) et/ou de la phase projet à réaliser. Le référentiel doit permettre aux utilisateurs d'autoévaluer la conformité aux règles et bonnes pratiques.

- Validation et Vérification continues

Aujourd'hui plusieurs métriques ont démontré que plus une non-conformité (erreur ou autres) est détectée rapidement, plus son impact sera mineur en termes de coût et de délai. Par ailleurs, la qualité peut également être mesurée en utilisant le critère « zéro erreurs ». Ces deux aspects sont liés : afin d'avoir un effet vertueux sur les deux, il est indispensable de détecter et corriger les erreurs au plus tôt, en mettant en place des pratiques de « vérification » continue. Pour tirer le meilleur crédit de l'activité de V&V continue, il est nécessaire d'automatiser l'intégration d'une part (pour construire les produits à vérifier), et la réalisation des tests de validation et de vérification d'autre part (pour avoir une mesure de la maturité et de la conformité). Ce volet n'est applicable qu'en prenant en considération l'équation économique de chaque projet. Ce levier n'est utile que s'il est accompagné d'un processus efficient de gestion des évolutions qui permette de corriger au plus tôt les erreurs détectées.

- Travail collaboratif

L'un des principes fondamentaux de l'ingénierie système est l'implication systématique de l'ensemble des parties prenantes pour la définition du système. Cette implication passe par la mise en place de méthodes collaboratives à plusieurs niveaux :

- Multi-domaines : direction technique, direction industrielle, programme, sûreté de fonctionnement, vérification, qualité, soutien logistique intégré, etc.

- Multi-niveaux : Système / Sous-système, produit

- Multi-métiers : électronique, hydraulique, mécanique, etc. L'organisation des sociétés et des projets peut amener à cloisonner ces domaines / niveaux / métiers avec pour conséquence de retarder les livrables par de nombreux allers retours entre entités, voire à ne pas prendre en compte certains besoins ou certaines contraintes (obligeant ainsi à reprendre les livrables).

Le travail collaboratif peut prendre plusieurs formes en fonction de l'objectif recherché et des contraintes d'organisation : outils / méthodes de relectures croisées (permettant de systématiser la prise en compte des retours de toutes les parties prenantes), revues des pairs (permettant de faire ponctuellement travailler ensemble des représentants d'entités différentes), plateaux intégrés multi-domaines / niveaux / métiers (assurant une collaboration continue des différentes entités par le biais de la mise en place d'équipes pluridisciplinaires, mais ayant un impact fort sur l'organisation et les ressources). Le travail collaboratif est donc également un moyen d'atteindre les objectifs de « correct par construction » (en impliquant l'expertise de l'ensemble des parties prenantes et en favorisant les échanges) et de « validation au plus tôt » (pour partager et comprendre les erreurs). Il permet aussi de faciliter le partage de compétences et la compréhension réciproque des contraintes des acteurs du projet, et être ainsi un facilitateur de la gestion des connaissances.

- Sûreté de Fonctionnement : Elle est considérée comme l'aptitude d'un système à remplir une ou plusieurs fonctions requises dans des conditions données ; elle englobe principalement quatre composantes : la fiabilité, la maintenabilité, la disponibilité et la sécurité. Elle traduit la confiance qu'on peut accorder à un système, la sûreté de fonctionnement étant, selon la définition proposée par Jean-Claude Laprie, « la propriété qui permet aux utilisateurs du système de placer une confiance justifiée dans le service qu'il leur délivre ».

Le processus de sûreté de fonctionnement est un processus itératif qui peut être déployé à chaque niveau de la décomposition, qu'elle soit systémique (système, sous-système, ...) ou organique. Il porte avec les autres processus les garanties qui sont nécessaires pour la certification d'un produit lorsque celle-ci est demandée. Son objectif principal est de garantir que tous les risques associés à la conception, au développement, à la production et à l'exploitation du système sont correctement identifiés, évalués, réduits et maîtrisés. Dans ce contexte, le processus de sûreté de fonctionnement inscrit ses objectifs dans les processus d'ingénierie et d'assurance qualité. Conformément à l'ARP-4761 ([ARP-4761]), le processus de sûreté de fonctionnement inclut la rédaction des exigences et la vérification.

Le processus de Vérification et Validation (V&V) traite, d'une part, de la validation – au sens de l'ARP-4754A ([ARP-4754A]) – en descente du V, et, d'autre part, de la vérification – au sens de l'ARP-4754A – et de la validation en contexte opérationnel du système en remontée du V. Au même titre que les autres processus, la V&V est un processus itératif qui peut être déployé à chaque niveau de la décomposition du système (à faire et/ou pour faire), du sous-système et de ses constituants. Il a pour objectif de porter les preuves de la conformité du système réalisé vis-à-vis du besoin du client. Par son organisation c'est un levier important de l'objectif « bon du premier coup » et participe également à l'objectif de conformité aux exigences de l'ARP-4754A ([ARP-4754A]) en fournissant un certain nombre des données demandées par la norme.

## ► 2-4 L'enseignement technique et scientifique

### *Vue introductive à l'enseignement technique et scientifique*

#### Formation initiale (Ingénieur)

- Ancrer dans la réalité d'un projet
- Qualification INCOSE ?

#### Formation continue

- Formalisation des acquis, profiter du Retex
- Domaine d'activité
- Spécialisation

#### Formation scientifique (Master Recherche & Professionnel)

- Domaines scientifiques : Modélisation, Simulation, Vérification, Validation, Optimisation.
- Domaines métiers : transport, aéronautique, automatiques.

#### *Commentaires de Bruno Monsuez*

- La nature transdisciplinaire de la conception, simulation et validation des systèmes cyber-physiques nécessite l'émergence de nouvelles formations ne s'inscrivant pas dans le schéma disciplinaire classique dispensé à l'Université et dans une moindre mesure dans les écoles d'ingénieurs. De plus, en fonction de la population d'étudiants et leurs connaissances antérieures, la formation aura des finalités et des modalités de mise en œuvre différentes. C'est ainsi que nous faisons une différence entre trois grandes familles de formation qui vont répondre à des objectifs différents :
- La formation initiale qui va avoir pour objectif de donner à de jeunes ingénieurs un bagage méthodologique, technologique et scientifique nécessaire pour appréhender les techniques et la mise en œuvre des approches lors des phases de conception des grands projets. La difficulté certaine de cette formation initiale vient du fait que, de par leur formation, les jeunes étudiants ont une vue disciplinaire des matières, que n'ayant jamais participé à des projets complexes, le besoin de maîtriser la complexité reste pour eux un concept relativement abstrait. Enfin la prise de conscience des problèmes aux interfaces n'est souvent possible qu'en dernière année de formation. Les écoles d'ingénieurs ont expérimenté diverses approches pour les grands systèmes du domaine des transports (ISAE, ECP, ENSTA ParisTech...) et commencent à proposer une telle formation à l'ensemble de leurs ingénieurs. Certaines vont offrir des parcours plus spécialisés, dans le domaine des systèmes cyber-physiques (ENSTA, ISAE), mais l'idée de donner à l'ensemble des ingénieurs une formation dans ce domaine reposant sur des projets dans le domaine de spécialisation de ces étudiants semble faire consensus. L'idée de préparation des étudiants à une certification de type INCOSE fait par contre débat, même si l'ISAE propose une telle option.
- La formation continue doit relever un autre défi. Au contraire des jeunes étudiants, ces personnes ont une bonne conscience de l'utilité d'une ingénierie système, des problématiques d'interface. Souvent, elles ont vécu des expériences où elles ont pu acquérir ces connaissances. Cependant du fait de leurs histoires ainsi que de pratiques métiers de l'entreprise, un grand soin doit être apporté pour prendre en compte cette hétérogénéité de pratiques et de connaissances aux fins de proposer une formation efficace ne se limitant pas à la découverte d'un nouveau vocabulaire. En fonction des pratiques, ces formations peuvent être proposées pour un domaine donné (Défense, Aviation, Automobile). Elles peuvent aussi être proposées dans le cadre de Certificat porté par une « Corporate University » ou université interne à une entreprise et un établissement de formation et de recherche habilité, voire éventuellement un Master, permettant une valorisation des personnes notamment à l'international.
- Enfin, la formation universitaire doit elle aussi évoluer et s'adapter à l'émergence de la simulation multi-physique, de l'ingénierie des systèmes complexes, de la problématique des interfaces, à l'instar des évolutions qui se sont produites dans les pays anglo-saxons ou dans les pays germaniques. La création du Master COMASIC dans le cadre de la chaire ingénierie des systèmes complexes, initialement entre Thales et l'École Polytechnique et regroupant désormais, Thales, Dassault Aviation, DCNS et la DGA, au niveau industriel, l'EP, Telecom ParisTech et l'ENSTA ParisTech a été l'une des actions initiatrices faites dans ce domaine. L'émergence d'une mention « Ingénierie des Systèmes Complexes » au niveau national ainsi que la création d'un ensemble de parcours dont notamment « Commande et Sécurité de Fonctionnement », « Systèmes Cyber-physiques ». Cette mention portée par l'Université Paris-Saclay ouvrira pour la rentrée 2016. Parallèlement à la création de cette mention, la nouvelle École Doctorale Interfaces au sein de l'Université Paris-

Saclay aura pour objectif de favoriser l'émergence d'une activité multi-disciplinaire, notamment dans le domaine de l'ingénierie des systèmes complexes.

## ► 2-5 Le message vidéo de Bruno Darboux

Bonjour,

*Je suis désolé de ne pas pouvoir être avec vous aujourd'hui. Mais je tenais à témoigner du soutien d'Airbus à toutes les initiatives permettant de consolider l'excellence française dans les systèmes embarqués. Et, en particulier, de l'importance pour Airbus de nous renforcer sur la modélisation et la simulation des systèmes cyber-physiques. Pour un avionneur, la simulation est devenue indispensable à la conception, au développement et à la certification des systèmes. Elle permet :*

- *de dimensionner et d'optimiser, par exemple, le système d'air, du prélèvement sur le moteur à la ventilation cabine,*
- *de maîtriser les comportements dynamiques, par exemple la séquence d'extraction du train d'atterrissage*
- *de mettre au point les lois de commande de vol,*
- *de démontrer la performance du système d'atterrissage automatique en vue de la certification.*

*Grâce à une modélisation plus complète, disponible plus tôt dans le cycle de développement, on doit arriver*

- *à définir des produits encore plus optimisés,*
- *mais aussi à réduire les temps de développement,*
- *et à réduire les coûts de développement.*

*Dans cette discipline, beaucoup a été fait, mais beaucoup reste à faire.*

*Une des conditions du succès est la capacité à coupler des modèles hétérogènes par nature (modèles de fonctionnement, modèles physiques, modèles d'environnement). Il faut donc définir des standards, des outils de développement performants, des plates-formes de simulation ouvertes.*

*C'est une entreprise collective, qui doit associer les laboratoires, les intégrateurs et systémiers, les éditeurs d'outils, les développeurs de modèles. Un projet de la Nouvelle France Industrielle s'attelle à cette tâche ambitieuse. Airbus y prendra toute sa part.*

*Je vous remercie de votre attention, et vous souhaite une excellente journée.*

Bruno Darboux

## ► 2-6 Synthèse

*En tant que moteurs décisifs de l'innovation, les systèmes embarqués constituent la véritable valeur ajoutée et le facteur de différenciation des produits de haute technologie (concepts fondamentaux) :*

- *Modélisation, dont virtualisation*
- *Architecture du système*
- *La capacité à coupler des modèles hétérogènes par nature, tel que Bruno Darboux, l'a souligné dans son message.*

## Commentaires de l'animateur

L'animateur propose la conclusion suivante : « couplage, le maître mot », à savoir, la capacité à coupler des modèles hétérogènes par nature, tel que Bruno Darboux, l'a souligné dans son message. Tous ces éléments, assortis de l'arsenal des mathématiques appliquées de notre école française constituent les ingrédients de la « potion magique, à confier à nos druides » pour transformer l'exception française en excellence française !

## ► 2-7 Les références utiles

Avant de conclure, quelques références pour aller plus loin sur le sujet ainsi que de la lecture pour la route ! Apports des références :

- Les bases ([EAL14])
- Synthèse de quelques travaux, dont ceux de l'ONERA, bâtis sur approche proche de celle de Berkeley ([GL13])
- Le site de la NSF, *National Science Foundation*, afin d'avoir des nouvelles d'Outre-Atlantique.

### 1. PROGRAMME NUCLÉAIRE CIVIL DU CEA

Dans le cadre du programme nucléaire civil, fin des années 1970, le Service d'Études Nucléaires du DRE a développé PHEDRE, Programme Hybride d'Études des Réacteurs à Eau, un modèle de simulation de réacteur à eau sous pression. Avec l'aide de CISI, PHEDRE a été implanté sur le calculateur hybride, exploité par CISI, qui est constitué de trois calculateurs et d'un pupitre de commande permettant l'interaction en temps réel entre l'opérateur et les calculateurs.

La mise au point d'un modèle aussi complexe a été guidée par un double souci :

- Disposer d'un outil particulièrement adapté pour les études de fonctionnement : procédures, modes de pilotage, contrôle...
- Pouvoir utiliser PHEDRE pour la formation de personnel, en raison de son fonctionnement interactif.

En parallèle, plusieurs thèses ont été conduites pour élaborer différents modèles numériques pour approfondir la connaissance des centrales, dont la simulation a été réalisée sous NEPTUNIX. Ci-après un résumé court d'une petite sélection :

- Véronique Dansac-Bon<sup>19</sup> a effectué ses travaux au SERMA. Dans sa thèse elle décrit la mise en équations et la simulation sur ordinateur numérique d'un modèle de générateur de vapeur à convection naturelle du type qui équipe les centrales FRA 900 MW. Des tests comparatifs, avec les codes BABRL (EDF) et SIRENE (CEA) sont présentés.
- Didier Delourme<sup>20</sup> a effectué ses travaux au SERMA. Dans sa thèse, il présente le développement du code PICOLO de simulation des centrales PWR. Il décrit essentiellement l'incorporation à PICOLO d'une description du pressuriseur et du circuit primaire, ainsi que celle des régulations correspondantes. Des tests de transitoires rapides ont été effectués et les résultats obtenus ont été comparés avec des transitoires réels de centrale.
- Jean-Marc Martinez<sup>21</sup> a effectué ses travaux au SERMA. La procédure optimisée du pilotage du cœur est un sujet tellement original (au sens, modélisations et calculs alternatifs) qu'une lecture approfondie s'impose. Les grands principes du contrôle y sont exposés ainsi que leur mise en œuvre, en vue de la sûreté.
- Patrice Metton<sup>22</sup> a effectué sa thèse au DEIN. Il a participé au portage de la bibliothèque de la phase numérique de NEPTUNIX sur mini-ordinateur de la société Télémécanique (machine 16 bits, à ressources restreintes) destiné à l'informatique industrielle et à l'expérimentation d'un simulateur produit par le solveur NEPTUNIX à des fins industrielles.

Forts de ces expérimentations, un premier simulateur numérique de fonctionnement, REPSI, a été réalisé par le CEA, à base de NEPTUNIX, avec le soutien de CISI. REPSI a été installé à INSTN Saclay en 1986 et a été intensivement utilisé dans la formation de Génie Atomique, jusqu'à mi-1996, date de disponibilité de SIPACT, en version station.

Parallèlement à cette réalisation, les chercheurs du Service des Piles de Grenoble ayant participé au succès de cette opération, emmenés par Michel Destot et Jean-François Musso, ont créé la société CORYS, ce qui a valu à l'animateur de la table ronde plusieurs séjours dans cette belle ville de Grenoble afin de « soutenir techniquement les équipes », dont le très regretté ami et collègue François Kaas.

19 V. Dansac-Bon : Modèle mathématique de générateur de vapeur pour centrale nucléaire ; Thèse soutenue à l'Université de Paris 11. 1978.

20 D. Delourme : Contribution à une étude de simulation d'une centrale électronucléaire PWR : code de fonctionnement PICOLO ; Thèse soutenue à l'Université de Paris 11. 1980.

21 J.-M. Martinez : Contribution aux études de fonctionnement des réacteurs à eau pressurisée : Élaboration par calculateur en ligne d'une procédure optimisée du pilotage du cœur ; Thèse de Docteur d'État soutenue à l'Université de Paris 11. 1983.

22 P. Metton : Implantation d'un programme de simulation numérique sur mini-ordinateur ; Thèse soutenue à l'Université de Paris 11.

### 2. PROGRAMME ROBOTIQUE DU CEA

Le programme de simulation en robotique a consisté en l'utilisation systématique du langage « Graphe de Liaison » pour la conception de lois de commande non-linéaires pour des robots considérés comme des systèmes mécaniques poly-articulés flexibles :

- Une première partie a consisté en la mise en place des procédures de modélisation en Bond Graph des robots manipulateurs. Leur extension aux robots à segments flexibles, basée sur la méthode de synthèse modale, a été proposée dans les travaux d'Attila Yazman<sup>23</sup>.
- Dans la thèse de Bernhard Maschke<sup>24</sup>, les notations en Bond Graphs généralisés ont été présentées ainsi que les équations dynamiques associées qui se déduisent d'une structure symplectique, de la même façon que les équations de Hamilton-Jacobi ou de Lagrange.
- Les travaux de Catherine Bidard<sup>25</sup> ont porté sur la modélisation de l'analyse ciné-statique des mécanismes spatiaux pour la robotique. Un cadre formel a été proposé, qui englobe une conception géométrique de la ciné-statique et une approche graphique de la modélisation, issue de la théorie des réseaux physiques et du formalisme des graphes de liaison. L'utilisation sous forme intrinsèque des torseurs statiques et cinématiques comme variables conjuguées de puissance définit une nouvelle classe de graphes de liaison : le graphe de liaison torsorial.
- Les travaux de thèse de Fabien Favret<sup>26</sup>, Ingénieur à GDF ont, entre autres, porté sur l'outillage et la communication modeleurs/solveurs à proprement parler.

De nombreux morceaux du prototype ALLAN™ Simulation ont été utilisés par CISI, avec autorisation du GDF, pour bâtir une maquette logicielle, SCRIBT, demandée par l'unité robotique du CEA en vue de montrer l'intérêt d'un pré-processeur graphique pour l'expression en « Graphe de Liaison » de systèmes techniques dont on veut simuler le fonctionnement. Une convention a été signée en 1991 entre le CEA et GDF pour mener l'étude de faisabilité sur ce point du contrôle, afin de construire le prototype démonstrateur et établir les spécifications complètes du logiciel outil correspondant (SCRIBT Modélisation).

À noter la création, à cette époque, des deux associations françaises :

- Le Club des Bondgraphistes (versus *TC16, Technical Committee On Bond Graph Modelling de l'association internationale IMACS*), pour accroître notre visibilité internationale relative à nos relations privilégiées avec l'université de Twente et les travaux menés en commun avec P. C. Breedveld autour des Graphes de Liaison.
- FRANCSIM, chapitre français de EUROSIM, créée en 1991, avec ces deux pôles « Simulation des systèmes continus » et Simulation des SED.

Entreprises créées :

- Michel Lebrun (notre conseiller scientifique, INSA Lyon) et ses associés créent la société IMAGINE (à présent LMS IMAGINE, filiale de Siemens PLM Software) avec pour mission de développer le logiciel AMESIM
- Attila Yazman, après sa 1<sup>ère</sup> aventure dans IMAGINE, a créé sa propre entreprise : Sherpa Engineering.

23 A. Yazman : Modélisation des robots flexibles par les Bond Graphs : application à l'analyse de leurs performances dynamiques ; Thèse, sous la direction de A. Bonnemay, soutenue à l'Université de Paris 11. 1988.

24 B. Maschke : Contribution à une approche par Bond Graphs de l'étude et la conception de lois de commande de robots contenant des segments flexibles ; Thèse CIRCEA (CISI), sous la direction de D. Normand Cyrot, Université de Paris 11. 1990.

25 C. Bidard : Graphes de liaison torsoriels pour la modélisation et l'analyse cinématiques des mécanismes ; Thèse sous la direction de J. Sau, soutenue en 1994 à l'Université de Lyon.

26 F. Favret : Aide à la communication modeleurs/solveurs et contribution à l'analyse des systèmes techniques complexes ; Thèse École Centrale des Arts et Manufactures, Châtenay-Malabry, 1995.

### 3. LEVIERS DES INITIATIVES PRIVÉ/PUBLIC

Aux travers des quatre initiatives (initiative C2A (Collaboration CAO Automatique), réseaux nationaux, pôles de compétitivité et dernièrement le Programme Investissements d'Avenir, PIA), les principaux atouts recherchés sont les suivants :

- Accroître la compétitivité et le potentiel d'innovation et garantir l'indépendance technologique des leaders dans les grands secteurs industriels
- Développer l'offre des éditeurs de logiciels au niveau mondial
- Conforter le positionnement européen et mondial des prestataires de service
- Rendre accessible l'usage de la simulation dans les PME/PMI et chez les sous-traitants des groupes industriels
- Mettre en place des plates-formes de conception de systèmes complexes.

Lancée à la fin des années 1980/début 1990, l'initiative « C2A » a permis d'asseoir l'excellence de la recherche française relative aux SED (DE en anglais) et de favoriser les collaborations recherche/industrie dans le domaine de la simulation. Entre autres, le groupe CEA (au travers de sa filiale CISI, à présent CSSI) et Gaz de France ont été très actifs ([MN93], [FF95]). Il est à souligner que dès le début des années 1990, Atlantpole, Chantiers de l'Atlantique, CISI, DCN, ECN, IRCN et SITIA ont créé l'association SIM•OUEST (précurseur des pôles de compétitivité), dont le Comité Scientifique était présidé par CSSI, afin de promouvoir les techniques de la simulation et de favoriser les échanges entre recherche et industrie.

Les réseaux (RNTL, RNRT...), les pôles de compétitivité ainsi que le PIA ont eu pour mission de structurer les différentes filières afin d'accroître leur visibilité et une mise en réseau des petits acteurs de ces filières :

- Dans l'embarqué :

Plusieurs projets (pilotés par), ou (avec la participation de) CSSI ont été labellisés et soutenus : ACOTRIS (voir encadré 4.1), ECLIPSE, METISSE, OPENEMBEDD<sup>27</sup> (voir encadré 4.2), TOPCASED<sup>28</sup>, USINE LOGICIELLE<sup>29</sup> (voir encadré 4.3)...

Le projet européen ASSERT<sup>30</sup> (Automated proof-based System and Software Engineering for Real-Time systems, IST FP6) a rassemblé une trentaine d'acteurs (dont CSSI et Verimag, pilotant conjointement le cluster DVT ; *un grand merci à Nicolas Halbwachs, pour son calme, son écoute et sa patience, surtout dans l'adversité !*) du secteur spatial européen de 2004 à 2007. La principale réalisation du projet est la définition d'un processus de développement adapté aux contraintes des applications spatiales, permettant la préservation de propriétés non fonctionnelles depuis la modélisation du système jusqu'au code généré. Deux chaînes d'outils ont été prototypées dans le cadre du projet. Depuis la fin d'ASSERT, ces chaînes d'outils ont profité de plusieurs évolutions et entrent désormais dans une phase de pré-industrialisation pilotée par l'Agence Spatiale Européenne (ESA).

- Dans le domaine de la conception et l'optimisation des systèmes, plusieurs projets (pilotés par), ou (avec la participation de) CSSI ont été labellisés et soutenus :
  - Pôle Aerospace Valley<sup>31</sup> : MACAO, OSMOSES, SONATE...
  - Pôle System@tic : IOLS, POPS, EHPOC, SCOS, CSDL, OPENHPC, LABS, CLIMB...

Un certain nombre d'avancées selon les axes énumérés ci-haut ont eu lieu et continueront.

### 4. TROIS PROJETS COLLABORATIFS DANS LE DOMAINE DE L'EMBARQUÉ

Le choix des trois projets des encadrés 4.1, 4.2 et 4.3 n'est pas anodin :

- Le but poursuivi est de montrer que la collaboration entre communautés de différents horizons est des plus bénéfiques, en l'occurrence, ici, les adeptes de l'asynchrone et ceux du synchrone.
- D'autant plus qu'en simulation de systèmes cyber-physiques, c'est la communauté de la simulation des systèmes physiques qui s'invite, pour élargir l'horizon.

Les acquis des expériences antérieures de CSSI (au travers des différentes versions de NEPTUNIX) en simulation hybride des systèmes techniques ont été déversés dans les projets que CSSI a pilotés ou auxquels CSSI a contribué. Le tableau ci-après résume l'acquis et le ou les projet(s) réceptacle(s).

ACQUIS	PROJETS RECEPTACLES
Langages synchrones	RNTL ACOTRIS pour le profil ACCORD du CEA, via SIGNAL et SynDEx, pour le cas d'étude système de contrôle d'un navire à cycle combiné
Formalisme, expressivité	RNTL ECLIPSE : amélioration du modeleur SCICOS et passerelle vers SynDEx pour le cas d'étude automobile PSA
Contrôle-commande	RNTL METISSE pour AMESIM
Méta-modèles, transformations...	FUI Usine Logicielle et OPENEMBEDD : élaboration du méta-modèle SCICOS, et ses transformations avec ATL et KERMETA vers SynDEx ; réalisation des cas d'études IFP et automobile PSA, sous environnement UML avec TOPCASED et le profil MARTE

27 [http://openembedd.org/home\\_html](http://openembedd.org/home_html)

28 <http://www.topcased.org/index.php>

29 <http://www.systematic-paris-region.org/fr/projets/usine-logicielle>

30 [http://www.esa.int/TEC/Software\\_engineering\\_and\\_standardisation/TECJ9UXBQE\\_0.html](http://www.esa.int/TEC/Software_engineering_and_standardisation/TECJ9UXBQE_0.html)

31 <http://www.aerospace-valley.com/>

► 4.1 **Projet RNTL2000 ACOTRIS, Analyse et Conception à Objets Temps Réel pour Implantation Synchrones**  
 ([MN01], [MN03], [MN05], [MN07b])

Labellisé en 2000 par le Réseau National des Technologies Logicielles (RNTL) et soutenu par le Ministère délégué à la recherche, le projet ACOTRIS (Analyse et Conception à Objets Temps Réel pour Implantation Synchrones) s’est conclu le 24 septembre 2003. Son objectif était de développer une chaîne d’outils pour le support d’une méthode innovante de conception de systèmes embarqués. Piloté par CS SI, le projet a mobilisé des compétences à CSSI, au CEA/LIST et à INRIA (Rennes et Rocquencourt) pour les développements scientifiques, ainsi que dans deux sociétés industrielles, MBDA et SITIA, pour la validation sur des modèles industriels.

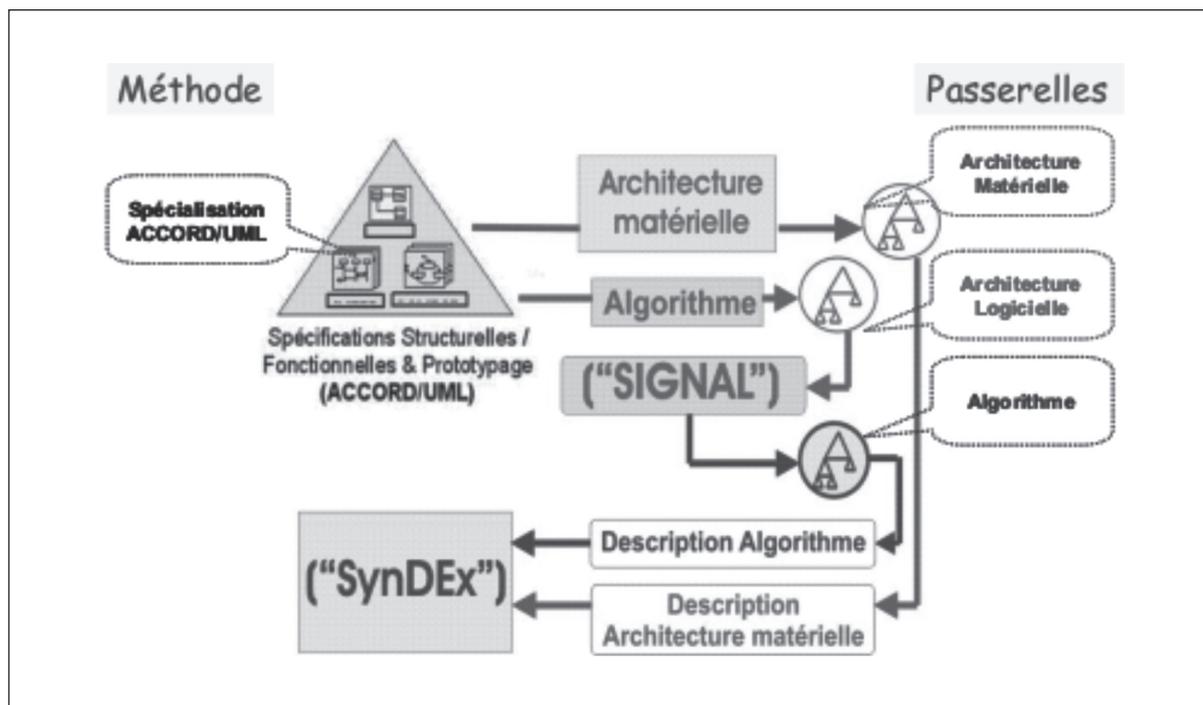
Les développements réalisés dans le cadre de ACOTRIS mettent en œuvre la méthode ACCORD/UML du CEA/LIST pour les aspects de modélisation et les acquis de ELACCS ([MN93]) pour le développement de deux passerelles de traduction du langage UML vers les environnements SIGNAL (INRIA Rennes) et SynDEx (INRIA Rocquencourt) afin de produire une implantation de l’application basée sur les approches synchrones (où le temps est vu selon un découpage logique et où la réaction à des événements est produite dans le même instant logique).

ACOTRIS a permis d’explorer deux approches de traduction de modèles UML vers des implantations synchrones :

- Dans la première, la sémantique d’exécution du standard UML est respectée et le synchronisme est ramené à un problème d’ordonnancement de l’exécution
- La seconde consiste à remplacer la communication asynchrone par files d’UML par une communication synchrone instantanée.

Différents outils permettant de passer d’un formalisme à l’autre ont été prototypés et validés sur deux applications projet :

- Un algorithme d’appariement d’images, fourni et modélisé par MBDA
- Un **système de contrôle d’un navire à cycle combiné** conçu par SITIA et CS SI, en relation avec les Chantiers de l’Atlantique.



**SYNTHÈSE :**

En ingénierie système, les formalismes multiples sont aux représentations ce que la pluridisciplinarité est aux sciences exactes. Les outils se doivent d’être au rendez-vous, et c’est au concepteur qu’appartient le choix de mobiliser la bonne représentation, au bon moment et d’opérer les compromis qui conviennent. ACOTRIS a été le déclic de la longue marche de l’évolution de « UML Profile for Schedulability, Performance and Time » (SPT), vers le profil « Modeling and Analysis of Real-Time and Embedded systems » (MARTE<sup>32</sup>). Un grand bravo à tous qui avez mené à bien cette adoption par l’OMG<sup>33</sup>.

32 <http://www.omgmarTE.org/>

33 <http://www.omg.org/>

#### ► 4.2 Projet FUI Usine Logicielle. « Development of an ATL transformation dealing with non trivial semantic issues: an industrial use-case »

([CF08], [EL08])

Au regard des problématiques IFP, il nous a semblé intéressant d'envisager l'utilisation de la transformation de modèles pour faciliter le passage des algorithmes de contrôle commande de la simulation en temps dilaté à l'exécution temps réel sur plate-forme distribuée. L'algorithme est d'abord représenté sous la forme d'un schéma bloc SCICOS et testé par simulation sur la plate-forme de développement. Nous voulons optimiser la distribution et l'ordonnement de cet algorithme et pour cela nous envisageons d'utiliser le logiciel SynDEx développé par l'équipe AOSTE de l'INRIA. Cependant, celui-ci a une représentation différente de l'algorithme. Il est donc nécessaire de transformer l'algorithme SCICOS en algorithme SynDEx et ce de manière automatique. CSSI a défini un méta-modèle pour SCICOS (source), l'équipe AOSTE

a défini un méta-modèle SynDEx (destination) et CSSI a spécifié les règles de transformation pour permettre ensuite la transformation automatique des algorithmes. En termes d'hétérogénéité des plates-formes le gain est double. D'une part, la transformation de modèle permet de passer automatiquement de la plate-forme de simulation à la plate-forme d'exécution distribuée temps réel, mais d'autre part le logiciel SynDEx rendra possible l'exploration d'architecture distribuée hétérogène : il permet de générer du code pour différentes architectures distribuées et celles-ci peuvent comporter des processeurs aux caractéristiques différentes, que ce soit matérielles ou logicielles (système d'exploitation).



### Use Case "base and goals"

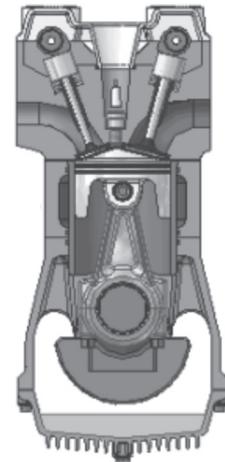
#### ■ Measure of an "engine combustion noise"

##### ■ Algorithm (IFP); complex:

- Acquire a «fram» whose measures are related to "before and after combustion high neutral (PMH)"
- Measure acquired each 0.3° of rotation of the bit-branch
- The rotation of the motor is also measured
- Compute «Fourrier transform» + "convert the energy in decibels"

##### ■ Algorithm "gluttonous in resources" (comments):

- Previous PMH Frame must be available
- Four acquisitions for each "engine cycle"
- Treatments frequency depends on the engine speed...



#### ⇒ Need for automatic distribution...

*Development of an ATL transformation dealing with non trivial semantic issues : an industrial use-case*



Toulouse, France 28Sep - 30Oct



#### SYNTHÈSE :

En ingénierie système, les formalismes multiples sont aux représentations ce que la pluridisciplinarité est aux sciences exactes. Les travaux de recherche relatifs à cette thématique se poursuivent à l'IFP [AB14]. Ils sont tellement cruciaux qu'une chaire industrielle internationale a été créée par ECN, Renault et LMS (à présent filiale de Siemens), avec pour objectif la recherche sur les nouvelles technologies pour les moteurs à combustion.

► 4.3 Projet RNTL2005 OpenEmbeDD. Le cas d'étude automobile

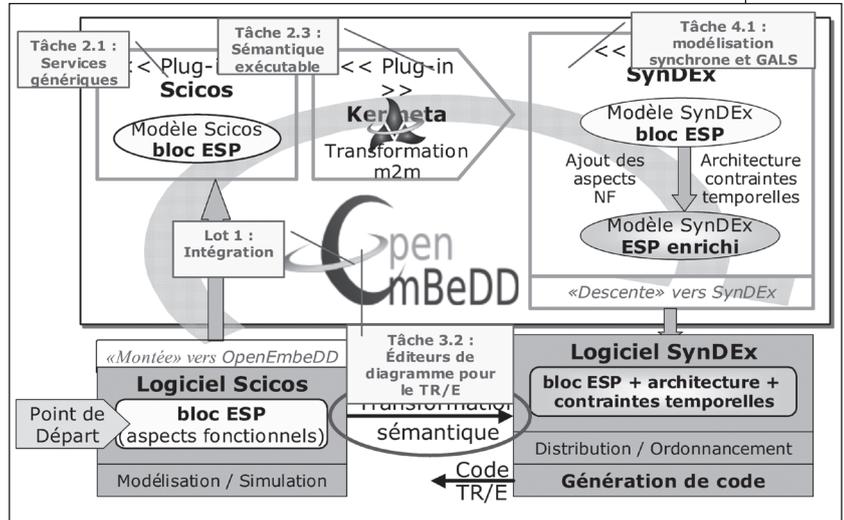
([TC04], [MN07b], [CA09])

Le cas d'étude automobile traité dans OpenEmbeDD s'apparente aux techniques de planification et d'optimisation de mouvement des véhicules mises en œuvre par PSA et expérimentées lors du projet RNTL2002 ECLIPSE. Pour mémoire, le comportement dynamique des véhicules est un enjeu stratégique pour les constructeurs automobiles. À travers la notion de sécurité active, les constructeurs mettent l'accent non seulement sur la capacité du véhicule à suivre la trajectoire souhaitée par le conducteur, mais également sur ses capacités d'évitement d'obstacles. Le modèle complet utilisé pour le cas d'étude comporte 431 blocs Simulink, 24 états et 12 degrés de liberté.

Il est constitué de 4 blocs fonctionnels principaux :

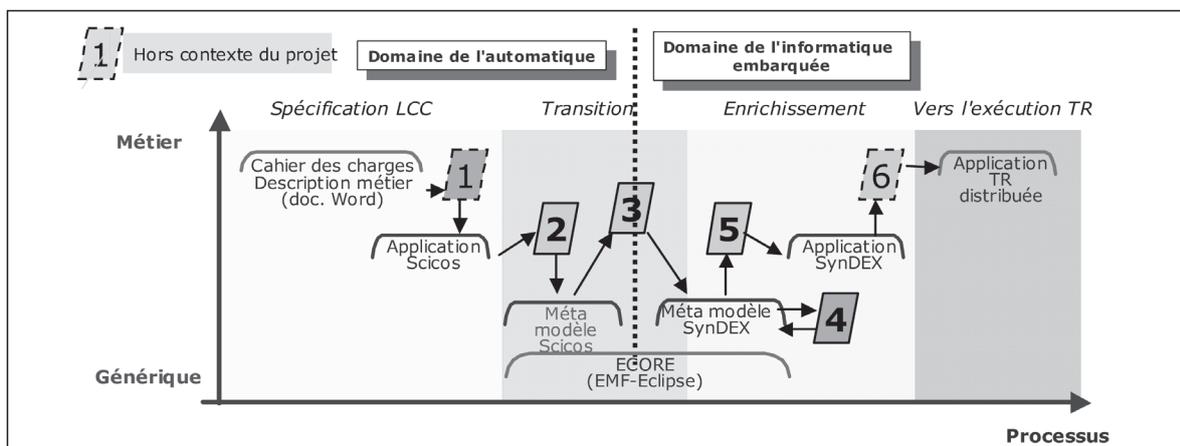
- Loi de Contrôle-Commande (LCC) : DAE (direction assistée électrique), ABS (assistance au freinage), ESP (correction de trajectoire)
- Dynamique du véhicule : roues (vitesse de rotation des roues, couple de freinage et accélération), masses non-suspendues (pivot des roues), cinématique des trains + élasticité, châssis (caisse + suspension), pneu (modèle Pacejka)
- Stimulations (actions conducteur)
- Visualisation.

Les objectifs assignés à ce cas d'étude étaient de reproduire dans OpenEmbeDD le processus initial en utilisant les outils de la plateforme OpenEmbeDD [8]. La procédure de validation consistait à comparer les deux approches sur un sous ensemble de la LCC PSA (ESP) et sa cible d'implantation (bi-proc/TCP). Le « design flow » associé à ce cas d'étude est représenté ci-dessous.



Le déroulé du processus OpenEmbeDD est représenté par la seconde figure ci-dessus. Les principales étapes en sont les suivantes :

- Spécification de la LCC sous SCICOS à partir du cahier des charges
- Portage (via génération de XML) vers le méta-modèle (MM) SCICOS
- Transformation (via KERMETA) du MM- SCICOS vers le MM-SynDEX
- Enrichissement du modèle par les aspects NF propres au MM-SynDEX (architecture et contraintes temporelles) via le plug-in TOPCASED-SynDEX
- Génération du fichier de format conforme à la grammaire de SynDEX
- Utilisation des fonctionnalités de distribution / ordonnancement et génération de code SynDEX.



LES RETOURS SUR EXPÉRIENCE CONSTATÉS SONT :

- Ergonomie du modeleur TOPCASED ECORE excellente ; fonctionnalité d'importation de ECORE vers TOPCASED très appréciable
- Modèle SynDEX cible obtenu et complet ; bonne identification des concepts SynDEX ; extraction vers SynDEX très appréciable...
- Équilibre de l'ergonomie entre manipulation par programmation et manipulation manuelle.
- L'outillage IDM de la plate-forme OpenEmbeDD s'est avéré riche, fiable et intégré ; le cas d'étude a été complètement validé et le processus associé à la conception de la LCC a été mené à bien.

## ■ PARTIE 3

### BIBLIOGRAPHIE

#### ► 1. Références

- Rapports 2010 et 2013 de Dominique Potier : <http://www.entreprises.gouv.fr/>
- Stratégie nationale de recherche en numérique : <http://www.enseignementsup-recherche.gouv.fr/>
- La nouvelle France industrielle : <http://www.economie.gouv.fr/nouvelle-france-industrielle>
- Vision de la commission européenne, priorités H2020 : <http://ec.europa.eu/europe2020/>
- NSF Perspective and Status on Cyber-Physical Systems : <http://www.nsf.gov/dir/index.jsp?org=CISE>

#### ► 2. Fondements des méthodes dirigées par les modèles

- [TIO84] T.I. Oren, B.P. Zeigler et M.S. Elzas : NATO Advanced Study Institute on Simulation and Model-Based Methodologies, an Integrative View. Springer-Verlag. 1984. "Proceedings of the NATO ASIS&MBM held at Ottawa, Ontario/Canada July 26-August 6, 1982", à laquelle l'animateur de la TR a participé, sur recommandation des membres français du Bureau (Pr. Jean Vignes et Romane Mezencev) et du Président (Pr. Robert Vichnevetsky) de l'International Association for Mathematics and Computers in Simulation (IMACS).
- [CSC86]: G. C. Vansteenkiste, E. J. H. Herkhoffs et L. Dekker : CSC86, Proceedings of the European Simulation Congress, Belgique, 1986

#### ► 3. Ouvrages récents sur les systèmes Cyber-Physiques

- [CPE14] Claudius Ptolemaeus, Editor : System Design, Modeling, and Simulation using Ptolemy II ; Ptolemy.org, 2014.
- [EAL14] E. A. Lee et S. A. Seshia : Introduction to Embedded Systems - A Cyber-Physical Systems Approach, Edition 1.5 ; <http://leeseshia.org/> ; 2014.
- [JCJ14] J.C. Jensen, E. A. Lee et S. A. Seshia : An Introductory Lab in Embedded and Cyber-Physical Systems v.1.60 ; <http://leeseshia.org/lab> ; 2014

#### ► 4. Ouvrages sur les «Formalismes»

- [AG62] A. Gill : Introduction to the Theory of Finite-State Machines ; McGraw Hill, 1962.
- [BZ84a] B. P. Zeigler : Multifaceted Modelling and Discrete Event Simulation ; Academic Press, Londres, 1984.
- [BZ84b] B. P. Zeigler : Theory of Modelling and Simulation ; Robert E. Krieger, Malabar, Floride, 1984.

- [CH85] C.A.R. Hoare : Communicating sequential processes ; Prentice Hall, 1985.
- [RC79] R. Cuninghame-Green : Mini Max algebra ; Springer-Verlag, 1979
- [RM89] R. Milner : Communication and concurrency ; Prentice Hall, 1989
- [ZK78] Z. Kohavi : Switching and Finite Automata Theory ; McGraw Hill, 1978.
- [ZN92] Z. Manna et A. Pnueli : The temporal logic of reactive and concurrent systems ; Springer-Verlag, 1992.

#### 5. Autres références

- [AB14] A. Ben Khaleda, M Ben Gaid, N. Pernet et D Simon : Fast multi-core co-simulation of Cyber-Physical Systems: Application to internal combustion engines ; Simulation Modelling Practice and Theory, 2014.
- [AB91] A. Benveniste et G. Berry : Real-time Systems Design and Programming ; Proc. of the IEEE, 79(9), Special Section "Another look at Real-time programming", 1991.
- [AB99] A. Benveniste, B. Caillaud et P. Le Guernic : CONCUR'99, Concurrency Theory, 10<sup>th</sup> International Conference, vol. 1664 of Lecture Notes in Computer Science, Springer, 1999.
- [ABC99] A. Buhising et C. Tardy : NEPTUNIX 4 : Un générateur de simulateurs ; SIM•OUEST98, 4 et 5 juin 1998, École Centrale de Nantes.
- [AC86] A. Cornet et F. Lorenz : Pluridisciplinary Systems Modelling ; CSC86, Proceedings of the European Simulation Congress, Belgique, 1986, pp. 52-56
- [ARP-4754A] Guidelines for Development of Civil Aircraft and Systems, 12-2010.
- [ARP-4761] Guidelines and Methods for Conducting the Safety Assessment Process on Civil Airborne Systems and Equipment, 12-1996.
- [CA09] C. André, M. Belaunde, A. Canals, S. Graf, V. Mahé, M. Nakhlé, R. Schneckenburger, R. de Simone, J.-P. Talpin, C. Teissède et F. Vernadat : La plate-forme OpenEmbeDD et ses outils d'ingénierie de modèles ; Journées de Travail NEPTUNE'2009, Paris, France, 26-27 mai 2009 ; voir revue Génie Logiciel, n° 89, pages 25 à 37, juin 2009.
- [CF08] C. Faure, M. Nakhlé et Y. Sorel : Development of an ATL transformation dealing with non trivial semantic issues: an industrial use-case ; MODELS'08 Workshop, 29 septembre 2008, Toulouse, France.
- [CL89] C. Lavarenne et Y. Sorel : SynDEx, un environnement de programmation pour multiprocesseur de traitement du signal ; Manuel de l'utilisateur V0. Rapport Technique 113, INRIA, 1989.
- [DVB00] D. A. van Beek et J.E. Rooda : Languages and Applications in Hybrid Modelling and Simulation: Positioning of  $\kappa$  (Chi) ; Control Engineering Practice, vol. 8, n° 1, 2000. pp. 81-91.

- [ECC91] C. Commault, D. Normand-Cyrot, J.M. Dion, L. Dugard, M. Fliess, A. Titli, G. Cohen, A. Benveniste, I.D. Laudau eds. : Proceedings of the First European Conference ; 2-5 juillet 1991 – Grenoble, Hermes 1991. France.
- [EL08] E. Ledinot, M. Nakhlé et P. Robin : Software Factory Testing Tools: an Analysis Framework ; 4<sup>th</sup> International Congress ERTS 2008. 29, 30, 31 janvier & 1<sup>er</sup> février 2008, Toulouse, France.
- [EL92] E. Larivière, Y. Monsef et M. Nakhlé : Aide à la conception de processus de production mixtes par la simulation ; Automatisation des Procédés Mixtes continus et séquentiels - ADPM'92, Paris, France, 29-30 janvier 1992.
- [EP12] E. Palachi : Simulating Cyber-Physical Systems using SysML and Numerical Simulation Tools ; 8<sup>th</sup> Haifa Verification Conference ; novembre 2012.
- [ES08] E. Seinturier : Le Programme fédérateur MOSART ; Présentation officielle du programme au Palais Beaumont. vendredi 21 mars 2008, Pau.
- [FB91] F. Boussinot et R. de Simone : The Esterel Language ; Proc. of the IEEE, 79(9), Special Section "Another look at Real-time programming", pp. 1293–1304. 1991.
- [FF12] F. Fouquet, G. Nain, B. Morin, E. Daubert, O. Barais, N. Plouzeau et J.-M. Jézéquel : An Eclipse Modelling Framework Alternative to Meet the Models@Runtime Requirements ; in Models 2012, Innsbruck, Autriche, octobre 2012.
- [FF95] F. Favret : Aide à la communication modeleurs/solveurs et contribution à l'analyse des systèmes techniques complexes ; Thèse École Centrale des Arts et Manufactures, Châtenay-Malabry, France 1995.
- [GB14] G. Berry : Esterel et SCADE : de la recherche à l'industrie ; Résumés des trois cours donnés à INRIA Sophia-Antipolis, les 15, 22 et 29 janvier 2014.
- [GL13] G. Lasnier, J. Cardoso, C. Pagetti et P. Siron : Environnement de coopération de simulation pour la conception de systèmes cyber-physiques ; Journal européen des systèmes automatisés, volume 47, n° 1-2-3/janvier-mai 2013. Modélisation des systèmes réactifs. MSR 20103. pp.13-27.
- [GN93] G. Noubir, D.R. Stephenes et P. Raja : Specification of Timed Finite State Machine in Z for Distributed Real-Time Systems ; Proceedings of the IEEE 4<sup>th</sup> Workshop on Future Trends in Distributed Real-Time Systems, pp 319-325, 1993.
- [HB08] H. Boussa, M. Nakhlé, J. Duysens et A. Sichaib : Virtual Laboratory for testing Anchors under Static and Cyclic Loads ; WCCM-8/ECCOMAS 2008, 30 juin - 4 juillet 2008, Venise, Italie.
- [JB99] J.-F. Broenink : Object-oriented Modelling with Bond Graphs and Modelica ; ICBGM'99 - WMC'99. San Francisco, CA, 17-20 janvier 1999.
- [JD07a] J. Duysens et M. Nakhlé : Le Projet EHPOC : Environnement Haute Performance pour l'Optimisation et la Conception ; Colloque IOLS, EDF R&D, Clamart, France, février 2007.
- [JD07b] J. Duysens, S. Langlois et M. Nakhlé : High Performance Computing Approach for Advanced Polymer Injection Molding Simulation ; 9<sup>th</sup> US National Congress on Computational Mechanics, 22-26 juillet 2007, San Francisco, CA, États-Unis.
- [JD08] J. Duysens et M. Nakhlé : TERATEC R&D HPC Projects ; Colloque TERATEC 2008, USA-France HPC Workshop ; 4 juin 2008, GENOPOLE, Évry, France.
- [JP81] J.L. Peterson : Petri Net Theory and the Modelling of Systems ; Prentice Hall, 1981.
- [MH87] M.A. Holliday et M.K. Vemon : A Generalised Timed Petri Net Model for Performance Analysis ; IEEE Transactions on Software Engineering, vol. 12, pp 1297-1310, 1987.
- [MN01] M. Nakhlé et F. Terrier : Analyse et Conception à Objets Temps Réel pour Implantation asynchrone / Synchrone ; Workshop «UML et Temps Réel», IRCCyN (École Centrale Nantes), France, 22 novembre 2001.
- [MN03] M. Nakhlé, T. Gautier et C. Modiguy : ACOTRIS: Real-Time and Model Checking ; Workshop Neptune. IRIT Toulouse, France, 22 janvier 2003.
- [MN05] M. Nakhlé & Consortium du Projet RNTL2000 ACOTRIS : Prototypage rapide, analyse et conception temps réel d'une application navire à cycle combiné ; Forum « Systèmes & Logiciels pour les NTIC dans le transport », Séminaires « Simulation & Transports », CNAM, Paris, 20 janvier 2005.
- [MN07a] M. Nakhlé et E. Seinturier : Zoom sur le Projet EHPOC & Les liens entre EHPOC et le programme fédérateur MOSART ; Colloque IOLS du Pôle System@tic Paris-Région, EDF R&D, Clamart, France, février 2007.
- [MN07b] M. Nakhlé et C. Faure : De la modélisation-simulation à l'implantation temps réel de systèmes complexes ; IliaTech : Modélisation, simulation et génération de code temps réel embarqué ; INRIA Rocquencourt, 17 décembre 2007.
- [MN09] M. Nakhlé : Présentation des projets collaboratifs en modélisation/simulation de systèmes complexes impliquant CS dans les Pôles System@tic et Aerospace Valley ; Journée nationale des utilisateurs de logiciels dédiés à la modélisation et au calcul scientifique (LMCS). Pôle universitaire Léonard de Vinci, La Défense. France, 3 décembre 2009.
- [MN78] M. Nakhlé, A. Bonnemay, V. Dansac Bon, Y. Monsef et P. Roux : NEPTUNIX, a Package for Continuous Modelling. Application to Nuclear Reactor Simulation ; Large Engineering System 2, Editors G. J. Savage, P. H. Roe. Sandford Educational Press 1978, Waterloo, Ontario, Canada, pp. 409-414.
- [MN79a] M. Nakhlé : Étude d'un langage et réalisation d'un système de simulation numérique muni d'une dérivation formelle. Applications aux réacteurs nucléaires, au langage-commande et aux réseaux électroniques : Thèse de Docteur ès Sciences. Université de Paris Sud, Centre d'Orsay. février 1979.

- [MN79b] M. Nakhlé et P. Roux : Large system real-time simulation on mini-computers ; 9<sup>th</sup> IMACS World Congress. Sorrento, Italie, septembre 1979.
- [MN82a] M. Nakhlé et P. Roux : NEPTUNIX : Un langage de simulation de systèmes continus ; 2<sup>nd</sup> IASTED International Symposium. Paris, France, 29 juin-2 juillet 1982.
- [MN82b] M. Nakhlé et P. Roux : Integration of non-linear stiff differential equations with discontinuities ; 10<sup>th</sup> IMACS World Congress. Montreal, Canada, août 1982.
- [MN83] M. Nakhlé et P. Roux : Vers la construction automatique de simulateurs portables de processus mixtes ; International Conference «Tools, Methods and Language for Scientific and Engineering Computation», Paris, France, mai 1983.
- [MN85] M. Nakhlé, P. Roux et Ch. Thomas De Montpreville : Simulation, an Everyday Tool for Research in Chemical Kinetics ; 11<sup>th</sup> IMACS World Congress. Stockholm, Suède, août 1985.
- [MN86] M. Nakhlé : NEPTUNIX, an efficient tool for large scale systems simulation ; 2<sup>nd</sup> International Conference on System Simulation in Buildings, Liège, Belgique, décembre 1986.
- [MN90] M. Nakhlé : Un système intégré de génération de simulateurs : ALLAN.<sup>TM</sup>/SCRIBT - ASTEC/NEPTUNIX ; Conférence Calcul Scientifique pour l'Aéronautique et le Spatial, Toulouse, France, 30 mai 1990.
- [MN91] M. Nakhlé, J.-P. Boujot, J.-P. La Hargue et P. Ravier : MEPS, Modelling Environment for Physical Systems, un système de CAO de modèles numériques ; Document CISI Ingénierie. Paris, France, 1991.
- [MN92a] M. Nakhlé et M. Pottier : Spécification, description et simulation de systèmes techniques mixtes (continus et discrets) ; Automatisation des Procédés Mixtes continus et séquentiels - ADPM'92. Paris, France, 29-30 janvier 1992.
- [MN93] M. Nakhlé et M. Pottier : Environnement Logiciel d'Aide à la Conception et au Contrôle-Commande de Systèmes techniques (ELACCS) ; Feuille de route, CISI Ingénierie et Gaz de France, version 0.5, septembre 1993.
- [MN94] M. Nakhlé : Simulateurs d'Études : État de l'art ; Conférence d'ouverture de l'atelier Simulateurs d'Études ; Journées Simulation Industrie et Marine. SIM•OUEST•94 ; École Centrale Nantes, France, 15-16 juin 1994.
- [MN95] M. Nakhlé et M. Pottier : Encadrement : *a priori*. Qualité numérique : *a posteriori*. Qu'y a-t-il d'accessible ?» Un vécu au travers d'un exemple technique. Workshop SIM•OUEST•95, École Centrale Nantes, France. mai 1995.
- [MN96] M. Nakhlé et J.-C. Masson : Simulation et discrétisation : Un essai de typage des méthodes ; Journées Simulation Transports & Marine, Conférence d'ouverture, SIM•OUEST 96, 12 juin 1996, École Centrale de Nantes.
- [MN98] M. Nakhlé et P. Marchal : Réalité virtuelle, une réalité de moins en moins virtuelle, Journées Simulation Transports & Marine, Conférence d'ouverture, SIM•OUEST 98, 4 & 5 juin 1998, École Centrale de Nantes.
- [NH91] N. Halbwachs, P. Caspi, P. Raymond et D. Pilaud : The synchronous dataflow programming language LUSTRE ; Proceedings of the IEEE, 1991.
- [NH93] N. Halbwachs : Synchronous Programming of Reactive Systems ; Rapport VERIMAG. 1993.
- [PG89] P.W. Glynn : A GSMP formalism for discrete event systems ; Proceedings of the IEEE 77(1), pp 14-23. 1989
- [PLG91a] P. Le Guernic, T. Gautier, M. Le Borgne et C. Le Maire : Programming real-time applications with SIGNAL ; Proc. of the IEEE, 79(9):1321-1336, Special section "Another look at Real-time programming", 1991
- [PLG91b] P. Le Guernic et T. Gautier : Data-Flow to von Neumann: the Signal approach ; in Advanced Topics in Data-Flow Computing ; J.L. Gaudiot et L. Bic, pp. 413-438. Eds, Prentice-Hall, 1991.
- [RK90] R Koymans : Specifying real-time properties with metric temporal logic ; Real-time systems, vol. 2, n°4, pp 255-299. 1990
- [TC04] T. Cambois : ECLIPSE Project: Modeling and simulation of vehicle dynamics and control systems in Scicos ; 1<sup>st</sup> Scilab International Conference, 2-3 décembre, 2004.

---

## BIOGRAPHIES

---



**Michel Nakhlé** est Conseiller Scientifique de l'activité Énergie Industrie & Services de CSSI et coordinateur technique du Projet DEPARTS. Il est titulaire d'une maîtrise EEA et ingénieur de l'École Centrale Nantes. Lors de sa formation d'ingénieur, il a travaillé à la SFIM sur la faisabilité de l'atterrissage vertical de l'Alouette 3. De 1973 à 1979, il a été ingénieur-chercheur au Centre d'Études Nucléaires de Saclay en contribuant au programme de simulation numérique du contrôle-commande des centrales nucléaires et a obtenu le grade de Docteur d'État. Courant 1979, il a rejoint CISI, d'abord en tant qu'ingénieur d'études, ensuite responsable de l'activité modélisation et de simulation des systèmes techniques, puis Conseiller Scientifique de la Branche Industrie jusqu'en 1977 (date de rachat de CISI par CSSI). Depuis, il a, entre autre, été de 2008 à 2012 à la Direction Technique de l'activité Aéronautique, Énergie et Industrie.

*CS is a designer, integrator and operator of mission critical systems. The company masters the fundamentals for deploying command and control information systems, implementing open, interoperable and up-gradable solutions, aligned as closely as possible with operational needs.*



**Philippe Baufreton** est expert senior en charge de la prospective pour les logiciels embarqués et les architectures au sein de la Division SAFRAN Electronics de Sagem à Massy. Il est membre du groupe NSL « Normes pour la Sécurité de fonctionnement Logiciel et système ».

*Sagem, a Safran high-tech company, holds world or European leadership positions in optronics, avionics, electronics and critical software for both civil and military markets. Sagem is the No. 1 company in Europe and No. 3 worldwide for inertial navigation systems (INS) used in air, land, and naval applications. It is also the world leader in helicopter flight controls and the European leader in optronics and tactical UAV systems.*



**Bruno Darboux** est Vice Président « Systems General Engineering » de Airbus.

*Airbus is a leading aircraft manufacturer with the most modern and comprehensive product line,*



**Bruno Monsuez** : Ancien élève de l'École Polytechnique (1989) et titulaire d'un doctorat ès sciences (1994) en informatique délivré par la même école, Bruno Monsuez dirige le département « Informatique et Ingénierie des systèmes » de l'ENSTA Paristech. Ses domaines de recherche actuels

portent sur le développement et l'amélioration de modèles mathématiques hiérarchiques et compositionnels pouvant être utilisés pour représenter des composants matériels et logiciels de systèmes embarqués complexes ainsi que sur des techniques formelles de vérification permettant une vérification conjointe de propriétés fonctionnelles et non-fonctionnelles du logiciel tout autant que du matériel auquel ce dernier est destiné.