



**HAL**  
open science

## Vers un apprentissage itératif à l'ingénierie système basée sur des modèles

Gérard Morel, Fabien Bouffaron, Olivier Nartz, Frédérique Mayer, Pascale  
Marangé, Eric Levrat, Hervé Panetto

### ► To cite this version:

Gérard Morel, Fabien Bouffaron, Olivier Nartz, Frédérique Mayer, Pascale Marangé, et al.. Vers un apprentissage itératif à l'ingénierie système basée sur des modèles. 10ème Conférence Francophone de Modélisation, Optimisation et Simulation, MOSIM'14, CRAN, UMR 7039, Université de Lorraine, Nov 2014, Nancy, France. hal-01087867

**HAL Id: hal-01087867**

**<https://hal.science/hal-01087867>**

Submitted on 27 Nov 2014

**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.

## VERS UN APPRENTISSAGE ITERATIF A L'INGENIERIE SYSTEME BASEE SUR DES MODELES

G. MOREL, F. BOUFFARON, O. NARTZ, F. MAYER, P. MARANGE, E. LEVRAT, H. PANETTO,

Université de Lorraine, AIP Lorrain - 745 Rue du Jardin Botanique - 54600 Villers-lès-Nancy  
{gerard.morel, fabien.bouffaron, olivier.nartz, pascal.marange, eric.levrat,  
frederique.mayer, herve.panetto}@univ-lorraine.fr

**RESUME :** La maturité croissante des environnements numériques de modélisation et de simulation permet d'envisager un management collaboratif à distance pour construire progressivement des spécifications exécutables multi-domaines d'une architecture système. L'apprentissage par projet à l'ingénierie système peut tirer parti de cette technologie numérique facilitant une construction itérative de modèles réalistes, contingente cependant à la construction du domaine de connaissances relatives aux interactions que le système à spécifier doit garantir avec son environnement d'intérêt. Nous proposons que cet apprentissage itératif soit guidé dans un premier temps de façon inductive sur la base de scénarios construits à priori de façon déductive par chaque tuteur à partir d'une spécification système unique d'une situation de référence. L'intérêt est d'asseoir l'apprentissage de ce paradigme système et de sa technologie en complémentarité avec l'approche analytique courante par discipline avant de mettre l'apprenant en situation autonome de projet.

**MOTS-CLES :** *Ingénierie Système, Apprentissage, Spécification, Simulation, Connaissance*

### 1 BONNES PRATIQUES D'INGÉNIERIE SYSTÈME

La complexité croissante de paradigmes de systèmes tels que les systèmes cyber-physiques, les systèmes de systèmes, les systèmes durables, ..., ainsi que la multiplication des domaines d'application en industrie mais aussi en santé, en urbanisme, en transport, ..., amènent les organisations professionnelles<sup>1,2</sup> ainsi que les organismes de standardisation à dépasser leurs approches historiques en management de projet d'ingénierie (Conforto *et al.*, 2013) (Ruault, 2014). La dichotomie respectivement centrée « affaire » ou « technique », qui a longtemps prévalu selon la formation des managers, ne permet plus d'appréhender de façon efficiente la dimension holistique d'un système constitué d'une multitude de composants en interaction dont l'ingénierie d'ensemble doit orchestrer en conséquence une multitude d'expertises spécialistes pour satisfaire de multi parties prenantes. Aussi, quelle que soit leur taille, les entreprises qui développent ces composants doivent satisfaire des exigences de certification qui les poussent à dépasser l'entrelacement ad-hoc de ces deux approches afin d'asseoir leur processus de développement en terme de niveau de maturité sur des standards adaptés de ceux des grands donneurs d'ordre «système ».

L'ensemble de ces processus supporte de façon concurrente les différentes phases et tâches du cycle de vie de définition, de développement, de déploiement et de retrait d'un système et de ses sous-systèmes. La figure 1 présente l'interdépendance entre le management de pro-

jet et l'ingénierie système et ses processus. Le corpus correspondant de connaissances en Ingénierie Système a fait l'objet d'un consensus international sous forme d'un guide (Pyster and Olwell, 2013) ainsi que d'un consensus national sous forme d'un ouvrage collectif (Meinadier et Fiorèse, 2012) que complètent les ouvrages de la collection en cours de (Faisandier, 2012).

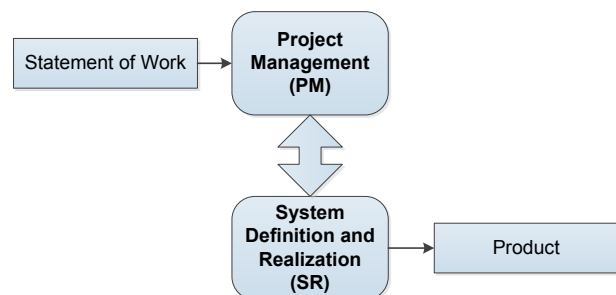


Figure 1 : Interdépendance entre les deux processus de management de projet et d'ingénierie système selon ISO-IEC 29110

D'un point de vue académique, bien qu'un curriculum de référence pour le déploiement complet d'une formation soit sous-jacent à ces travaux<sup>3</sup>, son déploiement au facteur d'échelle pédagogique pose un ensemble de questions, en termes de répartition d'effort entre formation disciplinaire et pluridisciplinaire ainsi que de pratiques d'*apprentissage par projet et problèmes* (Aguire & Raucant, 2002).

Une évolution récente du management de projet a pour objectif de faciliter la collaboration à distance afin de

<sup>1</sup> Project Management Institute ; [www.pmi.org](http://www.pmi.org)

<sup>2</sup> International Council on Systems Engineering; [www.incose.org](http://www.incose.org)

<sup>3</sup> Body of Knowledge and Curriculum to Advance Systems Engineering; [www.bkcase.org](http://www.bkcase.org)

réduire les prises de décision à chaque étape du développement dans un contexte économique compétitif. La maturité des technologies numériques de modélisation et de simulation permet d'envisager l'échange et la co-exécution de modèles autour d'un bus standardisé (Fig. 2) et d'une plateforme de modélisation multi-physique. L'intérêt industriel est de spécifier au plus tôt l'architecture du système visé avec des composants multi-domaines à intégrer pour réaliser l'architecture physique du système vers sa mise en exploitation. Nous explorons l'intérêt en pédagogie par projet de construire des spécifications exécutables d'une architecture système réaliste, par itérations successives mettant en œuvre un environnement de simulation reproduisant progressivement l'environnement opérationnel visé.



Figure 2 : Evolution multi-domaines de l'Ingénierie Système Basée sur des Modèles (Blochwitz *et al.*, 2012)

L'apprentissage par la pratique, guidé par les processus professionnels et / ou basé sur l'exécution de modèles, doit tenir compte de cette évolution récente du management de projet qui tend à intégrer séquençage des phases et parallélisme des tâches tout au long du cycle de vie d'ingénierie et d'architecture système (Sharon *et al.*, 2012).

## 2 APPRENTISSAGE PAR LA PRATIQUE DE L'INGENIERIE SYSTEME

Une première alternative d'apprentissage par projet consiste à mettre l'accent sur la formation disciplinaire aux ingénieries de parties de systèmes et à considérer que la part de professionnalisation pluridisciplinaire est assurée post-formation par l'intégration de l'apprenant en entreprise. Le projet est plutôt un moyen de susciter la créativité des apprenants guidés par des tuteurs dans un cadre classique de management séquentiel de projet. Le risque est que les apprenants intègrent de façon ad-hoc les diverses contributions disciplinaires dans une situation innovante sans avoir acquis au préalable les fondamentaux d'ingénierie et d'intégration système dans une situation formatrice de référence.

Une autre alternative, à laquelle nous avons adhééré, est d'asseoir au plus tôt la formation pluridisciplinaire au management des processus d'ingénierie et d'architecture système. Le projet est alors le moyen pour les apprenants de s'approprier par la pratique cette approche intégrative des ingénieries d'un système et de ses composants. Le retour d'expérience est le risque de réduire ou d'isoler la formation disciplinaire alors qu'elle est la base pour construire une solution système viable, voire de déléguer la formation pluridisciplinaire par projet à des consultants externes.

La première difficulté à laquelle nous avons donc dû faire face est la constitution d'une équipe pédagogique motivée pour se former à l'encadrement aux bonnes pratiques professionnelles ainsi que pour être à même de discerner ce qui est essentiel pour construire un cursus cohérent équilibrant formation disciplinaire et pluridisciplinaire. Cependant, l'approche système guidée par des processus<sup>4</sup> que prônent ces bonnes pratiques s'est avérée difficile à mettre en place en milieu pédagogique. D'une part, ces processus s'exécutent de façon concourante par itérations successives et de façon récursive pour chaque sous-système, depuis l'exploration du problème à résoudre conduisant à l'analyse de la mission du système jusqu'à l'intégration des composants alloués à une architecture physique solution via des représentations logiques intermédiaires. D'autre part, cette construction système « top-down » par faisabilités successives doit tenir compte au plus tôt de façon « bottom-up » d'éléments de solutions viables fournis par des spécialistes. En d'autres termes, ces « feedbacks » sous-tendent des capacités d'interactions pluridisciplinaires que peuvent avoir des praticiens mais que n'ont pas d'emblée les apprenants, ni en fondements d'architecture système d'une part, et ni en maturité d'ingénierie spécialiste d'autre part.

Ce sont ces prérequis système que Jean-Pierre Meinadier, précurseur en la matière, a mis en avant dans ses ouvrages et qu'Alain Faisandier complète, entre autres, par des fondements d'architecture système dans sa collection.

Bien que ces ouvrages constituent un référentiel support de formation par projet dont nous avons formalisé quelques artefacts essentiels (Gouyon *et al.* 2013), nous considérons à présent que l'apprenant doit être guidé en préalable pour percevoir ces interactions pluridisciplinaires sur une situation opérationnelle la plus plausible possible afin d'en acquérir les bonnes pratiques d'ingénierie. Cette situation, adaptée à chaque apprentissage visé, a pour objectif dans un premier temps de révéler à l'apprenant certains fondements essentiels (système d'intérêt à faire, processus support du système pour faire, ...) en étant guidé de façon inductive par un tuteur-architecte. L'apprenant s'appuie ensuite sur ses connaissances disciplinaires en ingénierie pour appliquer de façon déductive les fondements pluridisciplinaires acquis sur une étude de cas intégrative en changeant progressivement de rôle au cours du cursus. Ce n'est que lorsque cette approche système et ses fondements sont acquis de façon guidée que l'apprenant peut être mis de façon autonome sur une situation nouvelle de projet. Il est aussi possible de représenter ces éléments de solution système par des modèles et nous explorons dans nos travaux l'intérêt de nous appuyer sur un environnement numérique de co-exécution de modèles (Fig. 3), à l'instar de l'évolution des pratiques professionnelles évoquées en figure 2.

<sup>4</sup> Ingénierie des Systèmes et du Logiciel. Processus du Cycle de Vie Système ; ISO/IEC 15588 ; [www.iso.org](http://www.iso.org)

La section 3 propose une heuristique de co-spécification système basée sur des modèles pour mettre en évidence la contingence du résultat de modélisation à la construction du domaine des connaissances internes et externes requises. La section 4 présente une situation opérationnelle d'apprentissage d'une co-spécification particulière d'un *Système Intégré de Services de Mobilité de Production (SISMP)* sur laquelle s'appuient les tuteurs pour construire leurs différents scénarios pédagogiques.

Nous présentons en sections 5 et 6 deux scénarios d'apprentissage de cette co-spécification système, respectivement en interaction avec un domaine d'ingénierie opérationnelle et un domaine d'ingénierie spécialiste. Cette séquence de présentation ne traduit pas la séquence pédagogique qui consiste plutôt à s'appuyer d'abord sur des fondements disciplinaires pour intégrer ceux pluridisciplinaires d'*Ingénierie Système Basée sur des Modèles (ISBM)* puisque la cohérence d'ensemble est construite a priori (section 4). Notons aussi que cette séquence pédagogique doit nécessairement comporter une formation de base pour « penser système », afin d'architecturer en un tout cohérent l'ensemble des modèles de spécification d'un système d'intérêt tel que défini par (Boardman et Sauser, 2013).

Nos retours d'expériences nous permettent en conclusion de montrer les perspectives que cet apprentissage itératif peut apporter pour le développement de cursus en *Ingénierie de Systèmes Complexes*.

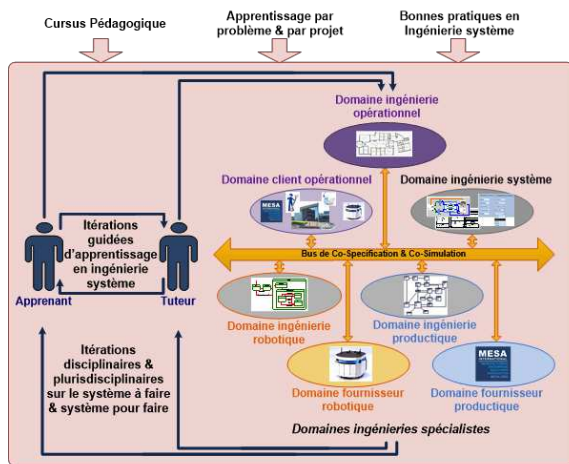


Figure 3 : Situation pédagogique d'apprentissage itératif à l'Ingénierie Système Basée sur des Modèles

### 3 APPRENTISSAGE ITÉRATIF DE CO-SPÉCIFICATION SYSTÈME BASÉE SUR DES MODÈLES

Cet apprentissage itératif se fonde sur un ensemble de principes pédagogiques qui vise à mettre l'apprenant en situation d'apprentissage inductive pour construire sa connaissance sur la base de scénarios, définis a priori de façon déductive par chaque tuteur à partir d'une spécification système unique d'une situation de référence. C'est le précepte de séparation entre « *espace-problème EP* »

et « *espace-solution ES* » qui nous est apparu très tôt fondamental pour tout apprentissage par projet afin d'éviter toute confusion quant aux rôles respectifs d'un apprenant et d'un tuteur : aucun ne doit être dans les deux espaces à la fois. Ce précepte est un fondement d'une spécification système  $S$  si l'on s'accorde à considérer qu'il s'agit du résultat d'un consensus contractuel itératif (un cahier des charges)  $S_D, S_P \rightarrow S$  entre une spécification système  $S_D$  décrivant ce qui est requis par  $EP$  et une spécification système  $S_P$  prescrivant ce qui est faisable par  $ES$ . La possibilité de vérifier et de valider de façon itérative par exécution de modèles l'ensemble des spécifications facilite la dynamique de construction du domaine de connaissance système nécessaire pour statuer sur  $S$ .

#### Co-spécification système

Plus formellement, il est suggéré par (Jin, 2006) qu'une spécification  $S$  est dérivable à partir d'un ensemble de connaissances et contraintes  $K$  sur l'environnement  $E$  à la source des exigences  $R$  du système requis selon :

$$K, R \rightarrow S \quad (1)$$

Cette proposition s'appuie sur différents travaux relevant de l'approche des « *problem frames* » en génie logiciel (Jackson, 1997), qui ont démontré que c'est la mise en œuvre réelle dans  $E$  du système spécifié par  $S$  qui garantit la satisfaction des exigences  $R$  selon :

$$E, S \vdash R \quad (2)$$

contraint par

$$K, S \vdash R \quad (3)$$

Cette contingence de  $S$  à  $K$  traduit la dimension holistique d'une modélisation système qui consiste à percevoir le système en spécification  $S$  comme un *Holon* (Kuras, 2006) en tant que :

- *TOUT* en regard des connaissances et contraintes externes  $K_H$  requises pour le spécifier selon :

$$K_H, R \rightarrow S_H \quad (4)$$

- *PARTIE* en regard des connaissances et contraintes internes sur chacune des parties  $K_h$  requises pour l'architecturer selon :

$$K_h, R \rightarrow S_h \quad (5)$$

Cela suggère une co-spécification itérative d'un système et de son architecture selon :

$$S_H, S_h \rightarrow S \quad (6)$$

qui est liée à une construction itérative du domaine de connaissance  $K$  de  $K_H$  vers  $S_H$  (vision externe) et de  $K_h$  vers  $S_h$  (vision interne) pour s'accorder contractuellement sur  $S$  en garantissant (3).

Cela sous-tend un ensemble de spécifications intermédiaires  $S'$  requérant la construction de connaissances intermédiaires  $K'$  contribuant à (1) pour satisfaire un raffinement  $R_i$  des exigences initiales selon :

$$K', R_i \rightarrow S' \quad (7)$$

### Co-spécification système exécutable

A l'échelle d'une spécification système multi-domaines, nous avons proposé (Dobre, 2010) (Lieber, 2013) que ce processus itératif soit orchestré par le domaine  $K_{IS}$  de l'Ingénierie Système. Ce domaine pivot a pour rôle de construire une spécification système selon :

$$K_{IS}, R_{IO} \rightarrow S_{IS} \quad (8)$$

satisfaisant les exigences des parties prenantes  $R_{IO}$  d'un domaine d'ingénierie opérationnelle en tenant comptes des contraintes architecturales de divers domaines d'ingénierie spécialistes.

Plus précisément, ces itérations se propagent entre les différents domaines tant que la connaissance d'un « *espace-solution* » n'est pas suffisante pour satisfaire les exigences d'un « *espace-problème* » requérant. Cette dynamique de recherche est à la base du processus « *holonique* » de spécification système puisque le domaine de connaissances se construit au fur à mesure de la perception des interactions à contrôler. Pour éviter que cette dynamique de recherche de connaissance ne soit contrainte par une organisation trop procédurale, nous avons revisité (Bouffaron, 2014) ce processus de co-spécification système en le distribuant autour d'un bus (Fig. 4). L'intérêt est de faciliter cette dynamique par notification ou diffusion auprès de spécialistes en préservant l'usage de leurs outils, méthodes et techniques de modélisation. L'intérêt sous-jacent est ainsi d'asseoir au plus tôt la faisabilité des spécifications intermédiaires, en termes de mesurabilité d'exigences, de contrainte architecturale et d'intégration de composants réutilisables.

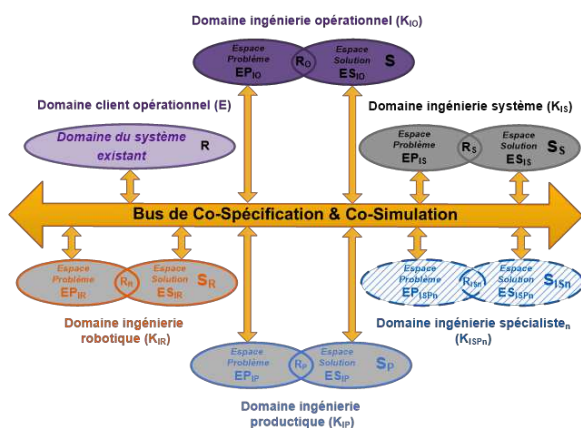


Figure 4 : Situation pédagogique multi-domaines de co-spécification & co-simulation système exécutable

Différentes techniques de travail collaboratif peuvent soutenir ce processus de co-spécification, disponibles dans les Environnements Numériques de Travail académiques ou comme suggéré en figure 2. La maturité croissante des environnements de travail autour des ateliers de modélisation système permet d'envisager la co-exécution itérative de modèles autour d'un bus de co-simulation. Ce bus de co-simulation remplace ainsi au fur et à mesure les techniques d'intégration de code très dépendantes des niveaux d'interopérabilité entre les ou-

tils de modélisation. Le niveau de confiance est ainsi augmenté pour vérifier, valider et intégrer au plus tôt des éléments de solution spécialiste. Enfin, la mise en œuvre d'environnements de simulation, de niveaux de maturité<sup>6</sup> progressifs, permet d'émuler au mieux des éléments systèmes  $Sh_{SIM}$  puis le système architecturé  $S_{H_{SIM}}$  pour garantir (3).

### Discussion

Ces fondements logiques et ces techniques d'un processus de spécification et d'architecture système sont à la base de la construction de nos scénarios pédagogiques. Notamment (1) qui relie la capacité de construire des faisabilités sur un réel à la capacité d'en percevoir les interactions émergentes pour satisfaire les interactions désirées.

Bien qu'ils s'appuient sur des travaux formels pouvant faire l'objet d'un cours plus spécialisé, c'est la représentation de ce processus sous forme de diagrammes de Venn que nous utilisons à ce niveau du cursus. Il s'avère qu'apprenants et tuteurs s'approprient facilement sous cette forme ce schéma mental de construction système  $K_{IS}$ , sur lequel nous nous appuyons pour faire acquérir des représentations système plus techniques pour représenter  $S_{IS}$ . La formation pluridisciplinaire complète ainsi  $K_{IS}$  par une formation à *SysML*<sup>7</sup> en tant que langage pivot de modélisation système et aux processus de la norme *ISO-IEC 15288* pour appliquer certaines bonnes pratiques « métier ». Le niveau de ces prérequis pluridisciplinaires  $K_{IS}$  dépend du rôle des tuteurs et apprenants relatif au scénario en situation.

Cependant, la formulation (1) suggère chez l'apprenant des capacités cognitives de perception et de représentation d'interactions indispensables pour s'approprier les fondements de l'approche système. L'acquisition de cet *interprétant système* est délicate et répartie en conséquence tout au long du processus inductif d'apprentissage. L'apprenant en situation dans l'« *espace-solution* » est d'abord guidé par un tuteur en situation dans l'« *espace-problème* » pour dériver une spécification intermédiaire (7) en interaction avec un domaine d'ingénierie spécialiste. Le tuteur s'attache à *bien faire percevoir* à l'apprenant ce qui est requis  $R_{IO}$  afin de *bien construire ses connaissances* pour *bien modéliser et spécifier*  $S_{IS}$  en tenant compte des faisabilités techniques spécialistes. Cette situation intermédiaire est, à notre sens, un autre point essentiel pour l'acquisition d'une connaissance pluridisciplinaire  $K_{IS}$  en s'appuyant au plus tôt sur des connaissances disciplinaires. Ce processus d'apprentissage individualisé est réitéré à des niveaux d'apprentissage collectif ou de nature différente jusqu'à maturité de l'apprenant vers une spécification opérationnelle.

Nous décrivons dans les sections suivantes la construction d'un scénario d'apprentissage itératif en *Génie Informatique & Intégration Système* de niveau Master.

<sup>6</sup> Echelle TRL (Technology Readiness Level)

<sup>7</sup> Systems Modeling Language ; [www.omg.sysml.org](http://www.omg.sysml.org)

L'apprenant est guidé d'une spécification système intermédiaire vers une spécification réalisée (2). Il s'agit là d'un point fondamental pour la pédagogie par projet qui implique un domaine d'intérêt intégratif  $E$  pour asseoir la réalité de la spécification du système d'intérêt étudié. L'important est que la séquence pédagogique multi-domaines soit construite sur la base d'un même raisonnement de spécification et d'architecture système, même si l'exécution des modèles de chaque scénario n'est pas unifiée autour d'un environnement commun de simulation.

#### 4 SITUATION D'APPRENTISSAGE D'UNE CO-SPÉCIFICATION SYSTÈME BASÉE SUR DES MODÈLES

La construction d'un scénario pédagogique entre un domaine d'*ISBM* et un domaine d'ingénierie opérationnelle fait l'objet de deux spécifications système afin que le tuteur puisse dériver :

- d'une situation réelle d'ingénierie opérationnelle  $K_{IO}, R_O \rightarrow S_{IO}$
- une situation plausible d'apprentissage d'ingénierie système  $K_{IS}, R_{IO} \rightarrow S_{IS}$  sans prescrire à la fois problème et solution.

##### Domaine d'Ingénierie Opérationnelle

Le domaine opérationnel est celui de l'*A IPL*<sup>8</sup> qui a vocation depuis sa création de fournir des situations pédagogiques reflétant au mieux la réalité industrielle. Son concept architectural originel est celui d'un *Atelier Intégré* de ressources physiques *de Production* où se manifeste la réalité de chaque *système à faire* en pédagogie conformément à (2). Cet atelier est entouré d'un ensemble de domaines de connaissances fournissant des ressources disciplinaires et pluridisciplinaires d'*Ingénierie Intégrée de Production*. La formation conjointe de l'équipe *A IPL* avec l'équipe pédagogique aux techniques d'*Ingénierie Système* a permis plus récemment d'asseoir méthodiquement l'intégration des différents domaines d'ingénierie de chaque *système projet* avec mise en œuvre dédiée d'un *outil de travail collaboratif*. L'usage d'un outil *PLM* permet la gestion des données d'ingénierie tout au long du cycle de vie des démonstrateurs tout en servant de base de connaissances aux tuteurs et apprenants.

La mission du système requis par les parties prenantes pédagogiques est d'assurer la mobilité de services de gestion de flux physiques dans le cadre du projet *Ambi-Flux* ayant pour finalité de faire évoluer l'*AIP* vers un *Atelier Ambient de Production*. Cet environnement opérationnel est siège de suffisamment d'interactions multiples homme-objet et objet-objet ainsi que de nature différente (matière, énergie, numérique, information, ...) pour apprendre à satisfaire une spécification globale via des spécifications intermédiaires. Ce projet met en œuvre des composants fournis (« COTS ») ou réalisés spéci-

quement. L'objectif est de mixer des itérations « top-down » et « bottom-up » permettant d'appréhender la dimension intégrative de l'ingénierie et de l'intégration système, en conformité avec les exigences de multi parties prenantes. Le concept architectural est un système intégré ayant pour fonctionnalités majeures de contrôler, gérer et maintenir les ressources allouées pour assurer les services de mobilité requis par les utilisateurs. Dans le cadre du sous-projet *SISMP* visé pour cet apprentissage, deux composants fournis et porteurs de leur ingénierie contraignent l'architecture applicative visée. L'un concerne le domaine d'ingénierie robotique avec un robot de service *PatrolBot*<sup>9</sup> et l'autre concerne le domaine d'ingénierie productive avec une implémentation spécifique d'une base de gestion d'information de pilotage au standard *IEC/ISO 62264*<sup>10</sup>.

Dans un premier temps, l'ingénieur *A IPL* (Fig. 5) dérive une spécification système  $K_{IO}, R_O \rightarrow S_{IO}$  à partir des besoins pédagogiques exprimés par les utilisateurs afin de fournir un démonstrateur satisfaisant construit en partie à partir de composants fournis satisfaisant (2). Il est important que ce démonstrateur, présenté au début de chaque apprentissage, ne soit pas un miroir de la pédagogie afin de refléter une réalité opérationnelle (*As-Is*) que l'implémentation de la solution (*To-Be*) doit modifier pour contrôler de nouvelles interactions ou de manière différente certaines existantes. L'ingénieur *A IPL* et la documentation associée constituent ainsi une source de connaissances pour décliner les différents scénarios pédagogiques.

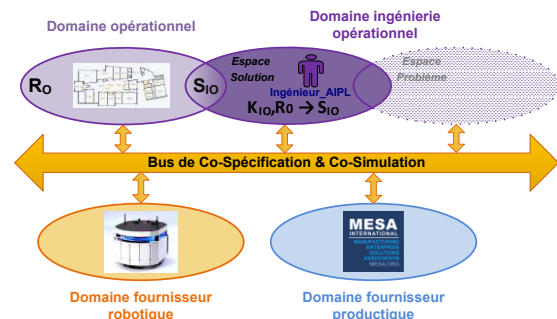


Figure 5 : Situation opérationnelle de co-spécification du *SISMP*

##### Domaine d'Ingénierie Système Basée sur des Modèles

Dans un deuxième temps, un tuteur doit orchestrer avec l'ensemble des tuteurs et en interaction avec l'ingénieur *A IPL* (Fig. 6) la situation opérationnelle  $R_{IO}$  à satisfaire dont l'apprenant devra dériver une spécification système  $K_{IS}, R_{IO} \rightarrow S_{IS}$  du *SISMP*. Plusieurs spécifications peuvent ainsi être dérivées d'une même situation en fonction des acquis des apprenants.

<sup>8</sup> Atelier Inter Etablissements de Productique Lorrain ; [www.aip-primeca.net](http://www.aip-primeca.net)

<sup>9</sup> [www.mobilerobots.com/ResearchRobots/ResearchPatrolBot.aspx](http://www.mobilerobots.com/ResearchRobots/ResearchPatrolBot.aspx)

<sup>10</sup> [www.mesa.org/en/B2MML.asp](http://www.mesa.org/en/B2MML.asp)

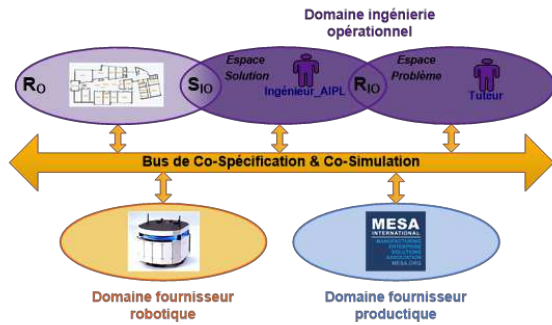


Figure 6 : Situation pédagogique de co-spécification du SISMP

L'objectif est de faire appliquer une démarche outillée d'ISBM pour produire des modèles comme livrables des processus de co-spécification et d'architecture système tout en assurant l'intégrité des référentiels de connaissances. Les deux outils<sup>11 12</sup> retenus sont complémentaires et offrent des possibilités de transformation de modèles pour des exécutions de certaines spécifications des parties contrôle ou gestion du système intégré visé. C'est cependant la structure du projet autour d'un environnement d'ISBM commun (Fig. 7) qui facilite l'interopérabilité sémantique entre modèles.

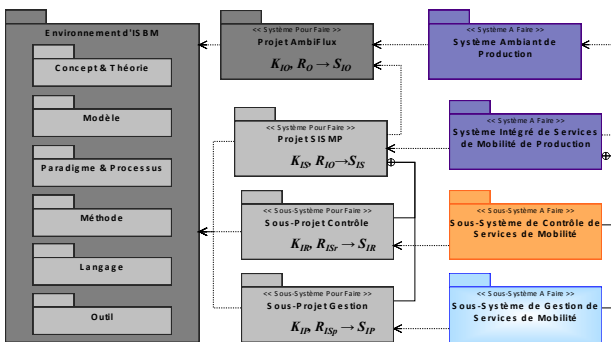


Figure 7 : Structure du système-projet SISMP et de ses sous-projets SCSMP et SGSMP partageant avec le projet AmbiFlux un référentiel de connaissances  $K_{IS}$

Bien que les notions de gestion de projet puissent être introduites par ailleurs, l'organisation du système-projet d'apprentissage est basée sur l'heuristique de modélisation présentée en section 3. Ceci nous permet de statuer sur la sémantique opérationnelle de SysML. Par exemple, la relation de description-prescription entre espaces problème et solution se note par des relations de dépendance « trace » et « satisfy ». Ces relations de dépendances assurent la cohérence multi-modèles et multi-domaines du système en spécification, en reliant tout résultat de modélisation aux exigences de parties prenantes du domaine opérationnel. De même, nous statuons sur l'usage des processus d'IS au cours du processus global de spécification. Par exemple, les processus de validation et de vérification sont associés respectivement à un *espace-problème* et un *espace-solution* dans

chacune des itérations. Ces connaissances en ISBM complètent l'heuristique de modélisation  $K_{IS}$  et sont des prérequis à la mise en situation d'apprentissage.

### Co-spécification exécutable

Cette spécification entre domaines peut être itérativement construite, vérifiée, et validée par exécution de modèles autour d'un bus de simulation<sup>13</sup> sur la base des travaux de recherche de (Bouffaron, 2014).

Par exemple, lors d'une phase de faisabilité, le choix du COTS « Patrolbot » peut faire l'objet d'une co-spécification exécutable pour simuler son comportement dans le domaine opérationnel AIPL (Fig. 8). Cette vérification / validation par exécution de modèles permet de coupler un modèle comportemental SysML de la spécification requise  $K_{IR}, R_{ISr} \rightarrow S_{IR}$  avec le simulateur du robot (MobileSim).

Cette technique de co-spécification exécutable peut faire l'objet d'un scénario d'apprentissage et induire une formation en génie informatique pour le développement d'un coupleur entre le serveur permettant d'interagir avec le simulateur du fournisseur. Il s'agit cependant d'une technologie récente et nous montrons dans les sections suivantes d'autres mises en œuvre du processus de spécification exécutable sur lequel est basée notre heuristique d'apprentissage.

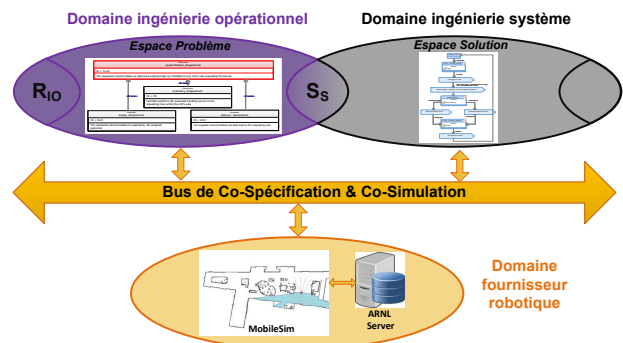


Figure 8 : Situation de co-spécification exécutable entre domaines d'ISBM et de composant système

## 5 APPRENTISSAGE D'UNE CO-SPÉCIFICATION SYSTÈME AVEC UN DOMAINE OPÉRATIONNEL

Ce scénario d'apprentissage met en œuvre trois itérations majeures entre les domaines d'Ingénierie Système, d'Ingénierie Opérationnelle, d'Ingénieries Spécialistes ainsi que de Rétro-Ingénierie Fournisseur pour appliquer l'heuristique de co-spécification système (Fig. 9). Il s'agit d'un scénario de fin de formation puisqu'il requiert des capacités d'analyse et de synthèse du système à spécifier  $K_{IS}, R_{IO} \rightarrow S_{IS}$  comme un *bloc système H* composé de *sous-blocs système h* respectivement de robotique et de productive dont les feuilles sont les COTS « PatrolBot » et « Mesa ».

<sup>11</sup> IBM® Rational® Rhapsody®; [www.ibm.com](http://www.ibm.com)

<sup>12</sup> MEGA SUITE®; [www.mega.com](http://www.mega.com)

<sup>13</sup> [www.site.cosimate.com/](http://www.site.cosimate.com/)

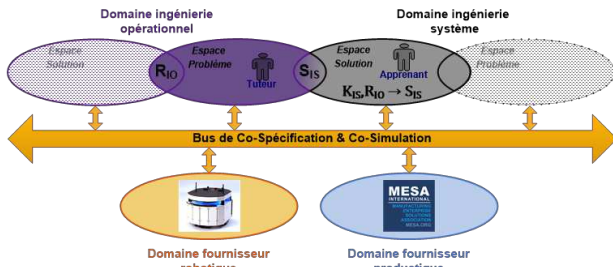


Figure 9 : Situation d'apprentissage de co-spécification du SISMP

A ce niveau d'apprentissage, l'objectif est d'amener l'apprenant à se détacher de la complication technologique pour bien situer la mission essentielle du système d'intérêt à faire en interaction avec les objets d'intérêt du domaine opérationnel, y compris en percevant qu'ils peuvent être source et puits d'interaction entre eux selon :  $K_{IS}H, R_{IO} \rightarrow S_{IS}H$ . Il est important que l'exigence initiale  $R_{IO}$  explicite comme sujet un objet finalisant porteur de propriétés observables et contrôlables par le SISMP à faire, perçu comme un tout  $H$  dont le comportement peut être vérifié par exécution de modèles (Fig. 10).

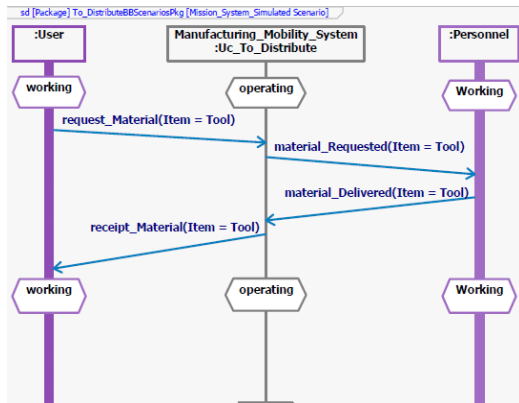


Figure 10 : Trace d'exécution d'un scénario opérationnel du SISMP requis par  $R_{IO}$

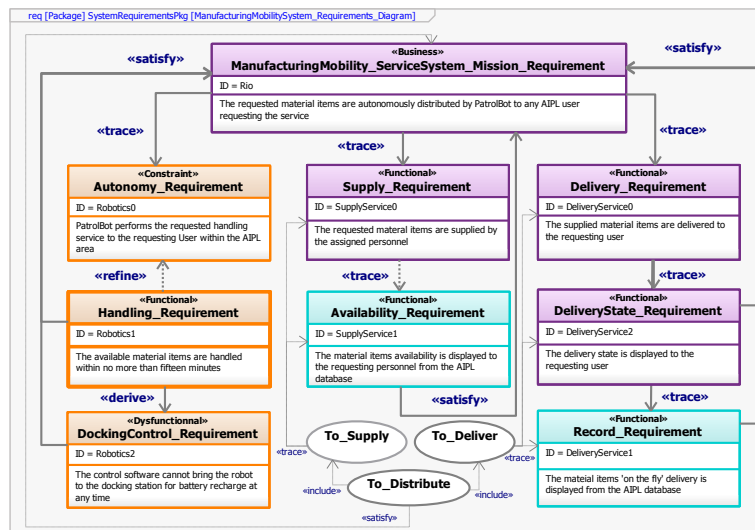


Figure 11 : Diagramme d'exigences-système mettant en évidence les domaines de connaissances en interaction

Le tuteur peut guider l'apprenant à faire une abstraction du comportement de type *Consommateur-Distributeur-Fournisseur* de services en regard de l'interaction essentielle « User - Personnel » que le SISMP doit numériser.

Cette mission comprise, l'ensemble des exigences système doivent aussi être bien formées (Fanmuy, et al. 2012) afin que leur sujet traduise aussi des connaissances  $K_{ISH_r}, R_{IO} \rightarrow S_{ISH_r}$  et  $K_{ISH_p}, R_{IO} \rightarrow S_{ISH_p}$  sur les « sous-blocs  $h$  : SCSMP et SGSMP ». Ce travail informel sur la spécification d'exigences système (Fig. 11) permet par raffinements successifs de modèles exécutables de construire une spécification fonctionnelle du « bloc  $H$  SISMP » prenant en compte au plus tôt des indicateurs de performances mesurables.

Cette spécification n'a des sens que lorsque l'ensemble des opérations spécifiées par les divers artefacts de modélisation, tels que les « cas d'utilisation », sont fusionnées en un seul bloc-système raffinant celui du scénario initial. La transformation de modèles que permet la méthode « Harmony » de l'atelier SysML support<sup>10</sup> facilite l'exécution d'un scénario raffiné de celui de la figure 13 pour vérifier puis valider un comportement du SISMP prenant en compte des exigences architecturales.

Dès ce niveau, l'apprenant est ainsi mis en situation d'architecturer un SISMP puis applique de façon réursive notre heuristique en « conception large » puis en « conception détaillée » pour allouer fonctionnellement puis organiquement l'ensemble des composants système. Pour que cet apprentissage ne se limite pas à la production de modèles, même exécutables, la contrainte « COTS » met l'apprenant en situation d'« intégration système ». Cette connaissance « bottom-up » des domaines spécialistes est issue d'autres scénarios pédagogiques comme décrit dans la section suivante en « robotique ».



En « *productique* », la spécification  $K_{IP}, R_{ISp} \rightarrow S_{IP}$  (Fig. 12) du *SGSMP* dépasse la simple intégration d'une base de données pour s'inscrire dans le cadre plus large du standard *IEC 62264* d'intégration d'un système d'information d'entreprise. Le « *COTS B2MML-BatchML*<sup>14</sup> définit une structure hiérarchique interopérable des composants fonctionnels et organiques du système étudié avec une approche « *cycle de vie PLM* » cohérente avec la dynamique d'un *SISMP* et le paradigme système.

L'apprenant est ainsi initié aux principaux préceptes et processus techniques d'*ISBM* dont l'application est plutôt approfondie en projet après cette préformation.

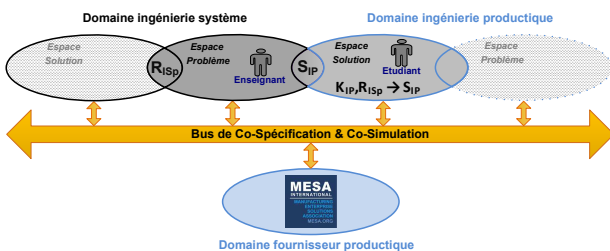


Figure 12 : Situation pédagogique de co-spécification du *SGSMP*

## 6 APPRENTISSAGE D'UNE CO-SPÉCIFICATION SYSTÈME AVEC UN DOMAINE SPÉCIALISTE

A ce niveau d'apprentissage, l'objectif est d'amener l'apprenant à construire une spécification système exécutable basée sur des modèles articulant des connaissances *ISBM* et disciplinaires, par exemple en robotique (Fig. 13) selon :  $K_{IR}, R_{ISr} \rightarrow S_{IR}$ .

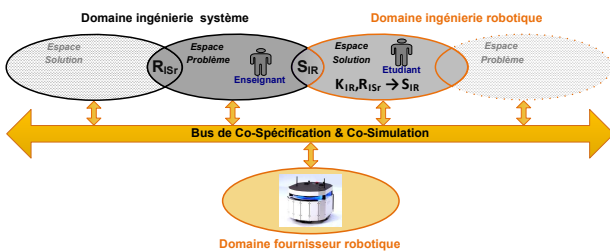


Figure 13 : Situation pédagogique de co-spécification du *SCSMP*

Nous avons postulé jusqu'à présent que notre apprentissage itératif devait être fondé scientifiquement pour être enseignée. Cependant, elle s'appuie sur des capacités de construction itérative d'un domaine de connaissances par l'apprenant que des techniques pédagogiques telles que *l'apprentissage par problème et par projet* peuvent aider à mettre en œuvre pédagogiquement.

### Problème :

La définition du comportement d'un acteur dans un scénario de spécification *SysML* procède le plus souvent du

dessin d'un *diagramme états-transitions* plutôt que d'une construction d'un modèle à l'aide d'un diagramme. Les éléments essentiels d'*état*, de *transition* et d'*action* ne sont pas assimilés par rapport à ce qu'ils sont censés représenter. De façon flagrante, la construction du diagramme commence par l'état initial sans compréhension du fait qu'il ne représente qu'un état initialisable parmi tous les états. La conséquence est la construction d'un diagramme réfléchissant le comportement attendu de chaque *cas d'utilisation* du système en spécification, alors que c'est ce *comportement externe* d'acteur qui doit stimuler le *comportement interne* du système décrit par ces cas d'utilisation. Si la mise en œuvre de la méthode de transformation de modèles « *Harmony* » permet l'exécution du comportement, elle ne pallie pas au fait que le modèle de comportement d'acteur ne soit que le reflet du comportement attendu du système spécifié. L'apprenant ne perçoit pas la situation à modéliser et la mise à disposition de la documentation du fournisseur de ce composant n'amène pas l'apprenant à y trouver en partie le comportement de cet acteur.

### Scenario pédagogique

Nous présentons l'activité pédagogique mise en place pour acquérir les compétences de modélisation du comportement d'un composant COTS de l'architecture ou d'un acteur permettant de supporter la phase de vérification par simulation de la spécification de *SCSMP*.

La démarche adoptée ici est « *bottom-up* » à l'intérieur de l'espace solution d'ingénierie spécialiste pour appréhender plus facilement l'ingénierie système. Dans notre scénario, il s'agit du robot *PatrolBot*, dont la connaissance du comportement s'inscrit dans le domaine d'ingénierie spécialiste de robotique. Le tuteur se situe dans l'espace-problème du domaine IS alors que l'apprenant est dans l'espace-solution du domaine spécialiste. Cette activité est basée sur une pédagogie par problème où l'apprenant est plongé itérativement dans des situations-problèmes, lui permettant de formuler la spécification de l'acteur et ses interactions de façon itérative comme :

- TOUT selon  $K_{IRH}, R_{ISr} \rightarrow S_{IRH}$
- PARTIE selon  $K_{IRh}, R_{ISr} \rightarrow S_{IRh}$

Dans cette séquence pédagogique, il s'agit notamment d'un point de vue des connaissances  $K_{IS}$  de montrer l'importance de disposer de comportements des acteurs, sans prédisposer du comportement du système à faire, afin d'en garantir une vérification objective. Ainsi le comportement d'un COTS ou d'un acteur doit-il être développé indépendamment du système à faire, idéalement par des tiers, voire obtenu auprès des fournisseurs. L'acquisition de cette compétence se fait au travers de deux activités, dans lesquelles l'apprenant est plongé itérativement dans deux environnements lui permettant de percevoir les interactions externes de l'acteur  $K_{IRH}$  à deux niveaux de raffinement successifs.

<sup>14</sup> Business To Manufacturing Markup Language (B2MML-BatchML) v0600, MESA International; [www.mesa.org/en/B2MML.asp](http://www.mesa.org/en/B2MML.asp)

### Activité 1

Cette première activité a pour objet de mettre l'apprenant en situation de spécifier le comportement du *PatrolBot*  $S_{IRh}$ , sous la forme d'un modèle Statechart, à partir de connaissances techniques du robot  $K_{IRh}$  et de la connaissance  $K_{IRH}$ .

La connaissance  $K_{IRh}$  est accessible dans la documentation du constructeur, alors que  $K_{IRH}$  se construit par l'usage des outils de simulation et de supervision distribués avec le robot (*MobileSim*, *ARNLServer* et *MobileEyes*). La modélisation du comportement (vue interne) se construit par observation du comportement du robot via le simulateur (vue externe) (Fig. 14).

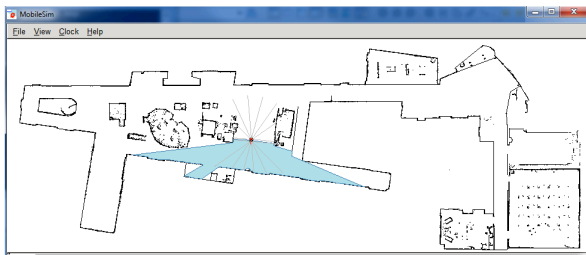


Figure 14 : Frontière du domaine d'intérêt en simulation

A travers cette activité, l'apprenant propose par exemple le modèle de la figure 15. Dans ce modèle, seuls les comportements observables dans le simulateur sont accessibles à l'étudiant, qui n'a du *PatrolBot* qu'une perception découplée de toute contingence opérationnelle (prise en compte des obstacles sur la trajectoire, durée de vie limitée des batteries). Ainsi le résultat de cette activité est que le comportement proposé par l'apprenant est découplé du comportement attendu du système spécifié. En ce sens, la connaissance  $K_{IS}$  est en voie d'acquisition mais demande à être approfondie.

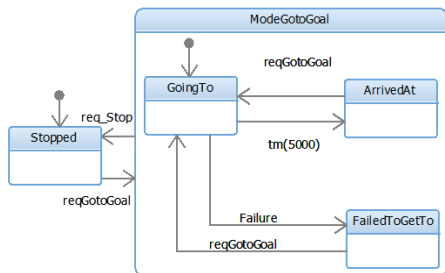


Figure 15 : Spécification  $S_{IRh}$  du comportement du robot *PatrolBot* après l'activité 1

### Activité 2 :

Cette seconde activité a pour objet de mettre l'apprenant en situation de reconsidérer sa spécification initiale dans un environnement opérationnel (Fig. 16).

L'étudiant est placé en situation d'observation du robot réel en fonctionnement opérationnel  $K_{IRH}$  du démonstrateur fourni par l'ingénieur AIPL. Ici, l'apprenant perçoit d'autres interactions non visibles dans l'activité 1 mais indispensables à prendre en compte dans le modèle d'acteur (*PatrolBot* peut lorsqu'il en a besoin retourner au dock pour se recharger, *PatrolBot* évite les obstacles sur son chemin, ...). Ainsi pour satisfaire aux relations

(2) et (6), il est nécessaire que l'apprenant recherche d'autres connaissances  $K_{IRh}$  de robotique pour être en mesure de raffiner le modèle d'acteur proposé dans l'activité 1. Cette spécification est ensuite prescrite au tuteur dans l'espace problème d'IS pour validation.

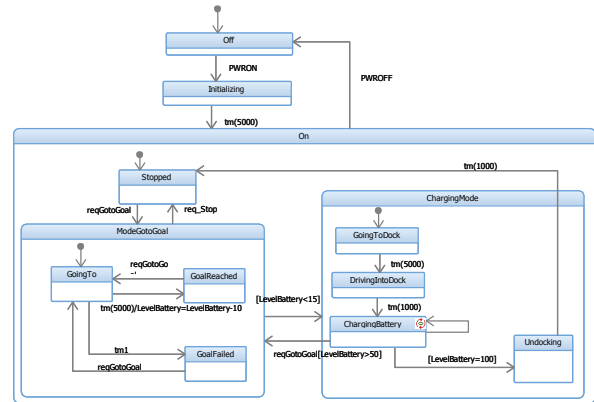


Figure 16 : Spécification  $S_{IRh}$  du comportement du robot *PatrolBot* complété après activité 2

## 7 DISCUSSION / CONCLUSION

Cette dernière séquence d'activités met en évidence quelques éléments de connaissances de fondements ISBM à révéler et à faire acquérir progressivement à l'apprenant :

- *Ingénierie Système* : l'apprenant découvre et apprend à construire un document de spécification d'exigences système (besoins des parties prenantes, contexte d'usage du système, contraintes architecturales,...) sans attendre que tout soit décrit a priori dans un unique cahier des charges.
- *Système* : l'apprenant découvre et apprend à penser  $H$  de façon pragmatique en tenant compte de  $h$  dans son domaine disciplinaire pour mettre en œuvre quelques préceptes systémiques difficiles à acquérir sans mise en situation guidée.
- *Modèle* : L'apprenant découvre et apprend l'activité de modélisation pour « *Do the Right Thing Right* ». La mise en œuvre itérative des processus de *vérification en espace-solution* et *validation en espace-problème* est essentielle. La simulation pallie alors à la difficulté de fournir l'ensemble des livrables-modèles d'une spécification système de façon correcte par construction.

Ces quelques éléments de réflexion mettent en évidence un autre intérêt de notre heuristique d'apprentissage pluridisciplinaire pour relier ... des éléments d'un cursus d'ingénierie. Encore faut-il accepter que la stimulation cognitive de ce qui est appris ne dépend pas uniquement de l'addition de connaissances mais aussi de capacités de perception des phénomènes abordés par les interactions dans et avec l'environnement.

Un prérequis est que ce cursus soit construit de façon collaborative par une équipe pédagogique sur les fondements de cette heuristique autour de quelques situations-clés. Si la formation aux multi-modèles des multi-

domaines peut-être un prérequis, l'heuristique présentée en section 3 sur des bases formelles montrent que ce n'est pas suffisant pour apprendre à modéliser. Il en est de même d'une formation aux bonnes pratiques d'Ingénierie Système guidée par les Processus comme discuté en section 1, voire d'approches pédagogiques sans heuristique de modélisation système comme discuté en section 2.

La discipline d'Ingénierie Système s'appuie sur des éléments d'ontologie pour « *Penser Système (H)* », en rupture avec l'analyse traditionnelle de « *Penser Solution (h)* », en se préoccupant de la façon dont les parties interagissent pour reproduire ou transformer l'ensemble (Lawson et al.). Cette partie du cursus ne peut s'enseigner de façon traditionnelle car il s'agit d'amener l'apprenant à se construire un schéma mental nouveau dans ce type de situation.

L'intérêt des travaux combinés pour proposer cette heuristique est d'apprendre à ... apprendre à « construire » système en architecturant logiquement des connaissances en évitant de systématiser l'application de ces éléments d'ontologie système comme cela est nécessaire ensuite pour « ingénierier » une solution. Nous préconisons cet apprentissage comme prérequis d'une situation de projet où l'apprenant peut appliquer des techniques de modélisation sur une situation nouvelle en évitant une démarche ad-hoc parce qu'il s'est construit en préalable son schéma mental de modélisation système.

Cette heuristique d'apprentissage a été immergée dans la réalité de diverses formations en ingénierie (écoles et masters), notamment à l'international en master *Erasmus Mundus PERCCOM*<sup>15</sup> et en local en master *Ingénierie de Systèmes Complexes*. Au moment où cette mention prend une dimension nationale soutenue, entre autres, par l'AFIS, cette opportunité nous permet d'appliquer ces travaux à l'échelle de construction d'un cursus complet, en s'appuyant aussi sur des techniques pédagogiques telles que l'apprentissage par problème et par projet.

## 8 REFERENCES

Aguirre, E., & Raucant, B. (2002, May). *L'apprentissage par projet... Vous avez dit projet? Non, par projet!*. In 19ème colloque de l'Association Internationale de Pédagogie Universitaire (AIPU), Louvain-la-Neuve-Belgique (Vol. 29).

Blochwitz T., Otter M., Akesson J., Arnold M., Claub C., Elmqvist H., Friedrich M., Junghanns A., Mauss J., Neumerkel D., Olsson H., Viel A., (2012), *Functional Mockup Interface 2.0: The Standard for Tool independent Exchange of Simulation Models*, 9th In-

ternational Modelica Conference, Munich, Germany, September 2012

Bouffaron, F., Dupont, J. M., Mayer, F., Morel, G. (2014) *Integrative construct for Model-Based Human-System Integration: a case study*. In 19 th World Congress of the International Federation of Automatic Control - Cape Town, South Africa.

Boardman, J., Sauser, B. (2013): *Systemic thinking: building maps for worlds of systems*. ISBN: 978-1-118-37646-1

Dobre D., 2010. *Contribution à la modélisation d'un système interactif d'aide à la conduite d'un procédé industriel*. Doctorat de l'Université Henri Poincaré, Nancy 1, 15-11-2010.

Conforto et al., 2013. *Improving the Integration of Program Management and Systems Engineering*. Whitepaper presented at the 23<sup>rd</sup> INCOSE Annual International Symposium, Philadelphia, USA, June 2013

Faisandier A., 2012. *Ingénierie et architecture des systèmes pluridisciplinaires*. Collection en cours de 7 guides de formation. Ed. Sinergy'Com, ISBN 979-10-91699

Fanmuy G., Fraga A. and Llorens J., 2012. *Requirements verification in the industry*, in Complex Systems Design & Management, ed: Springer, 2012, pp. 145-160.

Gouyon, D., Bouffaron, F., & Morel, G. (2014). *Specifying some key SE training artifacts*. In Complex Systems Design & Management (pp. 207-218). Springer International Publishing.

Jackson, M. (1997). *The meaning of requirements*. Annals of Software Engineering, 3, 5-21

Kuras, M.L. (2006). *A Multi-Scale Definition of a System*. M. T. Report, ed. (Bedford, MA: The MITRE Corp.), Report MTR 06B0000060, August, www.mitre.org.

Laporte C.-Y., Séguin N., Villas Boas G., Buasung S., 2013. *Small tech firms – Seizing the benefits of software and systems engineering standards*. ISO Focus+, Vol. 4, No. 2, February 2013, ISSN 2226-1095

Lieber R. (2013). *Spécification d'exigences physico-physiologiques en ingénierie d'un système support de maintenance aéronautique*. Doctorat (confidentiel) de l'Université de Lorraine, 06-11-2013

Lawson H.B., Wade J.P., Hofkirchner W. *Systems Science, Systems Thinking, Systems Engineering and Software Engineering*. Systems series published books, Editors:

<http://www.collegepublications.co.uk/systems/syt/>

<sup>15</sup> Pervasive Computing & COMMunications for sustainable development; <http://perccom.blog.univ-lorraine.fr/>

Meinadier J.P. et Fiorèse S., 2012. *Découvrir et Comprendre l'Ingénierie Système*. Ouvrage collectif de l'Association Française d'Ingénierie Système. Cepadues Editions. ISBN 9782364930056

Pyster, A. and Olwell D.H. (eds.), 2013. *The Guide to the Systems Engineering Body of Knowledge (SEBoK)*, v. 1.2. Hoboken, NJ: The Trustees of the Stevens Institute of Technology. Accessed 15 Nov 2013. [www.sebokwiki.org/](http://www.sebokwiki.org/)

Ruault J.-R., 2014. *Guide for the Management of Systems Engineering*. Insight Journal, April 2014, vol. 17, issue 1, p. 25-26

Sharon A., Dori D. (2012). *Integrating the project with the product for applied Systems Engineering management*, IFAC INCOM'2012 Symposium, Bucharest, May 23-25