



HAL
open science

Co-spécification système exécutable basée sur des modèles : application à la conduite interactive d'un procédé industriel critique

Fabien Bouffaron

► To cite this version:

Fabien Bouffaron. Co-spécification système exécutable basée sur des modèles : application à la conduite interactive d'un procédé industriel critique. Autre. Université de Lorraine, 2016. Français. NNT : 2016LORR0001 . tel-01754485v1

HAL Id: tel-01754485

<https://hal.univ-lorraine.fr/tel-01754485v1>

Submitted on 30 Mar 2018 (v1), last revised 27 Jan 2016 (v2)

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.



AVERTISSEMENT

Ce document est le fruit d'un long travail approuvé par le jury de soutenance et mis à disposition de l'ensemble de la communauté universitaire élargie.

Il est soumis à la propriété intellectuelle de l'auteur. Ceci implique une obligation de citation et de référencement lors de l'utilisation de ce document.

D'autre part, toute contrefaçon, plagiat, reproduction illicite encourt une poursuite pénale.

Contact : ddoc-theses-contact@univ-lorraine.fr

LIENS

Code de la Propriété Intellectuelle. articles L 122. 4

Code de la Propriété Intellectuelle. articles L 335.2- L 335.10

http://www.cfcopies.com/V2/leg/leg_droi.php

<http://www.culture.gouv.fr/culture/infos-pratiques/droits/protection.htm>

***Co-spécification système exécutable
basée sur des modèles
Application à la conduite interactive d'un
procédé industriel critique***

THESE

*présentée et soutenue publiquement le 08/01/2016
pour l'obtention du grade de*

Docteur de l'Université de Lorraine

(mention Automatique, Traitement du Signal et des Images, Génie Informatique)

par

Fabien BOUFFARON

Composition du Jury

Président : Dominique Mery, Professeur, LORIA, Université de Lorraine

*Rapporteurs : Ali Charara, Professeur, Heudiasyc, Université Technologie de Compiègne
Daniel Krob, Professeur, LIX, Ecole Polytechnique*

*Examineurs : Eric Bonjour, Professeur, ERPI, Université de Lorraine
Patrick Millot, Professeur, LAMIH, Université de Valenciennes et du Hainaut-Cambrésis
Gérard Morel, Professeur, CRAN, Université de Lorraine, (Directeur de thèse)*



« Se réunir est un début, rester ensemble est un progrès, travailler ensemble est la réussite. »
Henry Ford, industriel et fondateur de Ford.

Remerciements

Remerciements :

Nous y voilà !!!

Les trois dernières pages de ce mémoire, se situant paradoxalement au début¹.

« *Nous avons revisité le processus itératif, récursif et concourant de co-spécification-système basée sur des modèles exécutables selon le paradigme holonique* », il m'aura fallu quatre années pour finalement comprendre cette phrase, mais pas que ... =)

Thèse dans le domaine de l'Ingénierie des Systèmes, je me dois de commencer par des remerciements « systémiques ». En ce sens, MERCI A TOUS !!! En effet, « *la somme des parties n'est pas égale au tout* » et ce mémoire est le résultat de nombreuses rencontres et échanges avec un ensemble de personnes dont j'espère ne pas en oublier.

Ce travail de thèse a été réalisé dans le département ISET (*Ingénierie des Systèmes Eco-Techniques*) du CRAN (*Centre de Recherche en Automatique de Nancy*) de l'Université de Lorraine. Je remercie, les professeurs Alain RICHARD, puis Didier WOLF de m'avoir accueilli au sein du laboratoire, et offert un cadre propice à l'aboutissement de ces travaux.

Je remercie les rapporteurs de ce mémoire de thèse, le professeur Ali CHARARA du laboratoire HEUDIASYC (*HEUristique et DIAgnostic des SYstèmes Complexes*), ainsi que le professeur Daniel KROB du LIX (*Laboratoire d'Informatique de l'Ecole Polytechnique*) d'avoir consacré du temps pour l'examen de mon mémoire. Vos retours m'ont permis de prendre du recul sur mon travail.

Je remercie le professeur Dominique MERY du LORIA (*Laboratoire Lorrain de Recherche en Informatique et ses Applications*) qui a accepté de présider mon jury de thèse. Mais également, pour nos réunions de travail autour de la formalisation du processus de co-spécification système, durant lesquelles, je dois l'admettre, le niveau d'abstraction m'a parfois projeté dans la 4^{ème} dimension.

Je remercie aussi les professeurs Patrick MILLOT du LAMIH (*Laboratoire d'Automatique de Mécanique et d'Informatique industrielles et Humaines*) et Éric BONJOUR professeur au laboratoire ERPI (*Équipe de Recherche sur les Processus Innovatifs*) d'avoir accepté d'être examinateurs de mon jury de thèse.

Je remercie vivement mon directeur de thèse, le professeur Gérard MOREL, pour ses conseils, pour le temps qu'il a su m'accorder au quotidien, les réponses à mes nombreuses questions, le partage de son expérience, mais également pour son perfectionnisme à toute épreuve qui m'aura valu plus de quarante versions de mon introduction de thèse !!! De cette expérience est née une réelle complicité scientifique et humaine, au cours de laquelle nos nombreux échanges diurnes mais

¹ Il est d'usage de rédiger les remerciements, une fois le mémoire et la soutenance soutenue

Remerciements

surtout nocturnes nous aurons repoussés aussi bien l'un que l'autre dans nos retranchements. Merci de m'avoir fait l'honneur d'être le dernier thésard qui clôt trente années d'une longue lignée.

Je tiens également à remercier mon équipe de spécialistes, qui ont partagé avec passion et patience leurs connaissances, et qui m'ont permis d'aboutir aujourd'hui à ce résultat : Jean-Marc DUPONT (*Tu auras réussi à m'initier et à m'intéresser à l'étude des humains à travers tes nombreuses anecdotes et expériences de la vie de tous les jours*), Cédric JOIN (*J'aurais aimé connaître la CSM durant mes années de licence quand on me demandait d'identifier un système pour son contrôle*), Rémi PANNEQUIN (*le Géo Trouvetout » de la plateforme CISPI, jusqu'à la dernière minute tu m'auras assisté pour la faire fonctionner*), Jean-Pierre HENNEBICQ et Dominique GALARA (*Le partage de vos années d'expériences sur le terrain et en ingénierie, valent bien plus que tout ce que j'ai pu lire par ailleurs*), Frédérique MAYER (*La maitre Capello de la « Situation-Système » et de la « Penser-Système»*), Pascale MARANGE (*Ma grande sœur du laboratoire, pour notre collaboration animée durant la rédaction d'un article en commun, et le gâteau aux 3 chocolats*) et David GOUYON (*Tu m'auras accompagné et guidé dans mon évolution d'étudiant de master à celui de doctorant*).

Au-delà de ces collaborations scientifiques, je tiens à remercier l'ensemble du personnel du CRAN notamment les secrétaires (Anne PIANT, Maryse FERRY, Sabine HURAUX et Christelle KONDRATOW) qui ont toujours facilité au mieux mon parcours au laboratoire, l'équipe informatique, mais aussi la bonne humeur quotidienne des femmes de ménage. Je remercie également l'ensemble de l'équipe de l'AIP Lorrain qui m'a vu évoluer aussi bien en tant qu'étudiant que moniteur à l'Université de Lorraine. Je n'oublie pas la société KIASTEK pour m'avoir permis d'utiliser leur outil (Cosimate) et notamment Thierry ROUDIER dont le support technique a été précieux pour la mise en place de mon environnement de co-simulation système. Je remercie également le support de Philippe LEBLANC de la société IBM, qui se poursuit désormais au-delà du contexte de la thèse au travers de mes activités d'ingénieur système R&D chez Airbus Defence and Space à Toulouse. Cela m'amène naturellement à remercier mes collègues d'Airbus pour leurs soutiens et encouragements dans les dernières phases de rédaction du mémoire de thèse et lors de la soutenance.

Néanmoins, cette thèse va bien au-delà de l'aspect professionnel, la réussite de ce travail revient à un ensemble de personnes m'ayant soutenus au cours de ces quatre dernières années. Je pense dans un premier temps à Alexandre (*Bichon, sans oublier ta Bichonne*) avec qui nous avons partagé le bureau 603B pour le meilleur et pour le pire =), mes compagnons de pauses (*elles étaient nombreuses mais nécessaires*) : Thomas C (*Le stagiaire*), Thomas R (*Ta braguette !!*), Jeremy (*et ses blagues légendaires*), Damien (*combo : Piscine + Kebab*), Florent (*Ma b..., Ma b...*). Les fidèles et moins fidèles de la BSR (*Bureau du Simple Repos : une institution au laboratoire où la convivialité, les plats exotiques, les fous rires, ... étaient toujours au RDV*): Sylvain (*Et les anecdotes sur Saint-Quirin*), Gaby (*son smile et le chocolat*), Pierre (*le moniteur devenu collègue, puis amis*), William, Mario (*et ses litres d'huiles d'olives*), Benoit, Éric L (*ça a toujours été un plaisir d'échanger avec toi*), Éric R, Francis, Thierry, David, Jean-Philippe (*Le vrai Vosgien*), Laetitia, Leïla, Yong Xin, Esma (*La voisine de bureau*), Hervé, Alexandre V, Jean-François, Patrick, Anthonio (*Tu tournes toujours en rond pour réfléchir ??*)...

Remerciements

J'ai également trouvé un équilibre en dehors du cadre du laboratoire, où parfois on me regardait avec de gros yeux lorsque je me lançais dans des explications (*souvent fumeuses*) de mon sujet de thèse, mais où j'ai toujours su y puiser de la motivation pour poursuivre mes travaux. Ainsi, je remercie: Elodie (*La vosgienne, et oui un jour les Vosges domineront le monde*), Isabelle (*Ma poulette, tu me suis depuis le lycée ! Beaucoup de « boulettes » et de chemin parcouru depuis le temps*), Thibaut, Julie et Dawa (*Pagaille, La Normande, Dawabibel ... Mine de crayon l'investissement a porté ses fruits, vous avez pris soin de petit ourson devenu grand désormais, il aura fallu tout de même trois Rototom au compteur, Braaaa Braaaa !!!*), Julien (*Bachouss et les soirées du vendredi soir (muffins, taratata, ...)*), le meilleur remède pour déconnecter en fin de semaine), Jean-Baptiste et Ibrahim (*La team Prod-Show, va falloir revoir les flyers : DJ Doc aux platines ^^, que de bonnes soirées pleines de rebondissements*), Romain (*Enfin !!! Tu sais aussi bien que moi ce que veut dire une thèse avec Gérard, content que l'histoire se poursuive à Toulouse*), Lauriane (*Mon élève, l'entraînement continu !!! Merci d'avoir fait le déplacement pour la soutenance*) et Aurélie (*Coupineuuhh !! Finalement tu n'es plus si loin que cela, tu auras été le premier témoin de mon arrivée fracassante dans le sud ...*).

Je remercie également grandement mes parents, qui dès nos premiers pas ont tout mis en œuvre pour en arriver là aujourd'hui aussi bien pour moi que pour mes frères et ma sœur. Pourquoi faire simple, quand on peut faire compliquer, cela n'a pas été de tout repos : quatre enfants à élever, mais le résultat est au RDV. C'est en partie grâce à vous si j'ai pu en arriver là, MERCI. Mélanie, Vincent et Thomas, vous m'avez donné l'envie d'aller jusqu'au bout.

La meilleure pour la fin, je tiens à remercier Roxane (*ma chérie*) qui m'a supporté durant ces quatre dernières années. Cela n'aura pas été facile tous les jours, j'étais souvent derrière mon écran d'ordinateur à ne pas pouvoir t'accorder tous le temps que j'aurais voulu. Cependant, tu as toujours été présente pour me soutenir, me faciliter mon travail, me distraire, me faire rire (*oui même tes blagues de littéraire*) !!! Cette thèse c'est aussi la tienne =) et pas seulement parce que tu as corrigé les fautes d'orthographe, de grammaires de conjugaisons de ces 299 pages. Désormais, place à de nouvelles aventures mais cette fois-ci avec toi !!

PS : A toi lecteur qui aura été jusqu'au bout des remerciements, j'espère que tu as apprécié, car on passe aux choses sérieuses dans les prochaines pages ! Bonne lecture...

Table des matières

Table des matières

<u>Introduction générale</u>	1
1. Chapitre 1 : Contexte opérationnel de conduite du système à faire CISPI	8
1.1. Introduction : Caractérisation de la situation-système de conduite CISPI	8
1.2. Caractérisation de la situation-système de conduite du procédé industriel critique d'intérêt8	
1.2.1. Caractérisation de la situation dynamique de conduite	8
1.2.2. Caractérisation de la situation cognitive de conduite	10
1.3. Caractérisation de l'architecture-système de conduite du procédé industriel critique d'intérêt17	
1.3.1. Caractérisation de l'architecture existante.....	17
1.3.2. Caractérisation de l'architecture visée	21
1.4. Conclusion : Plate-forme CISPI constitutive de la situation système de conduite ciblée	24
2. Chapitre 2 : Contexte d'ingénierie interdisciplinaire du système pour faire CISPI	27
2.1. Introduction : Caractérisation de la situation-système d'ingénierie CISPI	27
2.2. Caractérisation d'une ingénierie de conduite centrée technique.....	28
2.2.1. Ingénierie système guidée par les processus	28
2.2.2. Ingénierie système basée sur des modèles.....	32
2.2.2.1. Ingénierie système basée sur les documents versus Ingénierie système basée sur les modèles	32
2.2.2.2. Modélisation d'architecture système.....	33
2.2.2.3. Virtualisation d'un modèle d'architecture système	36
2.3. Caractérisation d'une ingénierie de conduite centrée humain	39
2.3.1. Intégration Machine-Homme	39
2.3.2. Virtualisation d'un modèle d'intégration Machine-Homme.....	40
2.4. Caractérisation d'une ingénierie centrée système	41
2.5. Conclusion : Environnement de modélisation centré sur le système CISPI constitutif de la situation-système d'ingénierie ciblée	42
3. Chapitre 3 : Heuristique de spécification-système pour faire CISPI	48
3.1. Introduction : Caractérisation du processus de spécification d'un modèle total de CISPI	48
3.2. Paradigmes de spécification système	48
3.2.1. Paradigme de spécification orienté automatisation	49
3.2.2. Paradigme de spécification orienté problème.....	50
3.2.2.1. Systèmes techniques	50
3.2.2.1.1. Relation de description-prescription entre espaces problème-solution	51
3.2.2.1.2. Récursivité entre domaines orientés problème-solution	52

Table des matières

3.2.2.1.3.	Itération entre espaces problème-solution.....	53
3.2.2.2.	Systèmes sociotechniques.....	54
3.3.	Paradigmes de modélisation système	56
3.3.1.	Fondements holoniques.....	56
3.3.2.	Fondements systémiques.....	59
3.4.	Processus de modélisation holonique	60
3.5.	Conclusion : Heuristique holonique constitutive du processus de spécification-système ciblé	65
4.	Chapitre 4 : Environnement de spécification-système exécutable pour faire CISPI.....	66
4.1.	Introduction : Caractérisation de l'environnement de spécification-système exécutable CISPI	66
4.2.	Cadre de modélisation architecturale	66
4.2.1.	Cadre de modélisation architecturale CMMS-IAMS	67
4.2.2.	Cadre de modélisation architecturale SIAC	69
4.2.3.	Cadre de modélisation architecturale Système	70
4.3.	Environnement de co-modélisation et co-simulation exécutable	73
4.3.1.	Langage d'interopération système	73
4.3.2.	Bus de co-spécification système	75
4.3.3.	Bus de co-simulation système.....	77
4.4.	Scénario d'une co-spécification exécutable d'un modèle total du système de conduite CISPI	80
4.4.1.	Co-Spécification exécutable d'un modèle partiel d'un constituant physique	82
4.4.2.	Co-spécification exécutable d'un modèle partiel d'un constituant logique.....	85
4.4.3.	Co-spécification exécutable d'un modèle partiel d'un constituant technique d'actionnement.....	86
4.4.4.	Co-spécification exécutable d'un modèle partiel d'un constituant physiologique de mesurage	88
4.5.	Conclusion : Environnement collaboratif constitutif du processus de spécification-système exécutable ciblé	89
5.	Chapitre 5 : Co-spécification exécutable d'un constituant physique du système de conduite CISPI	94
5.1.	Introduction : Interaction physique ciblée du système CISPI.....	94
5.2.	Co-spécification système d'un modèle d'interaction physique de modulation de débit d'eau	94
5.2.1.	Spécification descriptive d'un modèle d'exigences constitutif d'une interaction physique de modulation de débit d'eau.....	94
5.2.2.	Spécification prescriptive d'un modèle comportemental constitutif d'une interaction physique de modulation de débit d'eau.....	96
5.2.2.1.	Eléments de modélisation d'une interaction physique.....	96
5.2.2.2.	Définition d'un modèle comportemental de l'interaction physique ciblée.....	97
5.2.3.	Co-intégration système d'un modèle comportemental constitutif d'une interaction physique sûre de modulation de débit d'eau.....	100
5.3.	Co-spécification système d'un modèle exécutable d'interaction multi-physiques de modulation de débit d'eau	103

Table des matières

5.3.1.	Spécification prescriptive d'un modèle exécutable constitutif d'une interaction multi-physiques de modulation de débit d'eau	104
5.3.1.1.	Éléments de connaissances en modélisation processive d'une interaction multi-physiques	104
5.3.1.2.	Construction d'un modèle multi-physique exécutable de l'interaction ciblée.	112
5.3.1.3.	Traduction d'un modèle exécutable constitutif de l'interaction multi-physiques ciblée	115
5.3.1.3.1.	Modèle structurel multi-physiques	116
5.3.1.3.2.	Modèle comportemental multi-physiques.....	119
5.3.2.	Co-intégration système d'un constituant d'interaction multi-physiques de modulation de débit d'eau.....	121
5.4.	Conclusion : Co-Spécification exécutable d'un modèle partiel constitutif de la partie physique ciblée	125
6.	Chapitre 6 : Co-spécification exécutable d'un constituant logique du système de conduite CISPI	126
6.1.	Introduction : Interaction logique ciblée du système CISPI	126
6.2.	Co-Spécification système d'un modèle exécutable constitutif d'une interaction de contrôle de modulation de débit d'eau	128
6.2.1.	Spécification descriptive d'un modèle d'exigences constitutif d'une interaction de contrôle de modulation de débit d'eau.....	128
6.2.2.	Spécification prescriptive d'un modèle exécutable constitutif d'une interaction de contrôle de modulation de débit d'eau.....	130
6.2.2.1.	Éléments de connaissances d'une interaction de contrôle.....	130
6.2.2.2.	Construction d'un modèle exécutable de contrôle de l'interaction ciblée	132
6.2.2.3.	Traduction d'un modèle exécutable de contrôle de l'interaction ciblée	135
6.2.3.	Co-intégration d'un modèle exécutable constitutif d'une interaction de contrôle de modulation de débit d'eau.....	137
6.3.	Co-spécification exécutable d'un modèle constitutif d'une interaction de commande de modulation de débit d'eau	140
6.3.1.	Spécification descriptive d'un modèle d'exigences constitutif d'une interaction de commande de modulation de débit d'eau.....	141
6.3.2.	Spécification prescriptive d'un modèle exécutable constitutif d'une interaction de commande de modulation de débit d'eau.....	142
6.3.2.1.	Éléments de connaissances d'une interaction de commande.....	142
6.3.2.2.	Définition d'un modèle exécutable de commande de l'interaction ciblée	143
6.3.3.	Co-Intégration système d'un modèle constitutif d'une interaction de commande de modulation de débit d'eau.....	151
6.4.	Conclusion : Co-spécification exécutable d'un modèle partiel constitutif de la partie logique ciblée	153
7.	Chapitre 7 : Co-spécification exécutable d'un constituant technique d'actionnement du système de conduite CISPI.....	158
7.1.	Introduction : Partie « actionnement intelligent » du système de conduite CISPI ..	158
7.2.	Co-spécification système d'un modèle d'interaction logico-physique de modulation de débit	159

Table des matières

7.2.1. Spécification descriptive d'un modèle d'exigences constitutif d'une interaction physique de modulation de débit	160
7.2.1.1. Éléments de connaissances d'une interaction physique	160
7.2.1.2. Définition des exigences de l'interaction physique ciblée	161
7.2.2. Spécification prescriptive d'un modèle d'exigences constitutif d'une interaction logique de modulation de débit.....	163
7.2.2.1. Éléments de connaissance d'une interaction logique	163
7.2.2.2. Définition des exigences de l'interaction logique ciblée.....	163
7.2.3. Spécification prescriptive d'un modèle exécutable constitutif d'une interaction logico-physique de modulation de débit.....	165
7.2.3.1. Éléments de modélisation exécutable d'une interaction logico-physique	165
7.2.3.2. Définition d'un modèle exécutable de l'interaction logico-physique ciblée	170
7.3. Co-intégration système d'un constituant d'interaction logico-physique de modulation de débit	172
7.3.1. Intégration d'un modèle constitutif de l'interaction ciblée	172
7.3.2. Intégration d'un composant constitutif de l'interaction ciblée	177
7.4. Conclusion : Co-spécification exécutable d'un modèle partiel constitutif de la partie d'« actionnement intelligent » ciblée	180

8. Chapitre 8 : Co-spécification exécutable d'un constituant physiologique de mesurage du système de conduite CISPI..... 181

8.1. Introduction : Partie « mesurage intelligent » du système de conduite CISPI.....	181
8.2. Co-spécification système d'un modèle d'interaction physico-physiologique de détection sonore	183
8.2.1. Spécification descriptive d'un modèle d'exigences constitutif d'une interaction sensorielle de détection sonore	184
8.2.1.1. Éléments de connaissances d'une interaction sensorielle.....	184
8.2.1.2. Définition des exigences de l'interaction sensorielle ciblée.....	185
8.2.2. Spécification prescriptive d'un modèle d'exigences constitutif d'une interaction physiologique de détection sonore	186
8.2.2.1. Éléments de connaissances d'une interaction physiologique	186
8.2.2.2. Définition des exigences de l'interaction physiologique ciblée	189
8.2.3. Spécification prescriptive d'un modèle exécutable constitutif d'une interaction physico-physiologique de détection sonore.....	193
8.2.3.1. Éléments de modélisation exécutable d'une interaction physico-physiologique	193
8.2.3.2. Définition d'un modèle exécutable de l'interaction physico-physiologique ciblée	198
8.3. Co-intégration système d'un constituant d'interaction physico-physiologique de détection sonore	199
8.3.1. Intégration d'un modèle constitutif de l'interaction physico-physiologique ciblée .	200
8.3.2. Intégration d'un composant constitutif de l'interaction physico-physiologique ciblée	203
8.4. Conclusion : Co-spécification exécutable d'un modèle partiel constitutif de la partie « mesurage intelligent » ciblée	207

Table des figures

Table des figures

Figure 1 : Interprétation du diagramme de couplage système (HW Lawson, 2010)	2
Figure 2 : Systémigramme explicatif des relations TOUT et PARTIE de notre heuristique de co-spécification exécutable basée sur des modèles d'un système d'intérêt	3
Figure 3 : Proposition d'un environnement de co-spécification système exécutable basée sur des modèles.....	4
Figure 4 : Domaine d'ingénierie et d'exploitation d'un système de conduite (Devic & Morilhat, 2013).....	6
Figure 5 : Cadre d'analyse d'une situation-système de conduite	8
Figure 6: Principaux circuits de refroidissement d'un REP (adaptée de (Duco, 2004)).....	10
Figure 7 : Système de conduite d'un procédé en exploitation	11
Figure 8 : Interaction physico-technico physiologiques de conduite.....	12
Figure 9 : Principe de l'Approche par Etat (Appell & Chambon, 1998)	13
Figure 10 : Conduite du procédé nucléaire vue comme une évolution entre états stables à travers le temps (Galara & Hennebicq, 1999).....	15
Figure 11 : Représentation de la situation d'états du système ASG à différents niveaux d'abstractions (Viel, Cheriaux, & Galara, 2012)	15
Figure 12 : Modèle de la conduite par un opérateur d'une situation dynamique (procédé nucléaire) (Vicente, Mumaw, & Roth, 2004).....	16
Figure 13 : Schéma d'exécution du mode opératoire de « mise en brassage de la Bâche ASG » (Viel, Cheriaux, & Galara, 2012)	17
Figure 14 : Organisation du système de conduite.....	18
Figure 15 : Distribution des fonctions et des opérateurs de conduite autour d'un bus d'objet métier	21
Figure 16 : Concept architectural d'un système de conduite	22
Figure 17 : Afin de pouvoir augmenter les capacités des vannes manuelle (OMT) un certain nombre de fonctions et de traitements (OLT) sont nécessaires, allant de la connexion physique des signaux de la vanne jusqu'à la communication (sans fil) des informations associées (Dobre, 2010)	23
Figure 18 : Architecture multi-agents du SIAC (vert = agent disponible, bleu = agent en exécution, rouge = agent en exclusion) (Dobre, 2010)	24
Figure 19 : Processus physique de la plate-forme CISPI à conduire (hydraulique) – Emulation du procédé ASG (Alimentation Secours des Générateurs de Vapeur)	25
Figure 20 : Salle de commande de la plate-forme CISPI du CRAN	25
Figure 21 : Système de conduite d'un procédé en exploitation, adaptée de (Galara & Hennebicq, 1999).....	27
Figure 22 : Domaines couverts par les trois normes générales de l'ingénierie système (Fiorèse & Meinadier, 2012)	29
Figure 23 : Cartographie des processus du cycle de vie du système (ISO 15288) (Fiorèse & Meinadier, 2012).....	29
Figure 24 : Relations entre l'ingénierie du système et l'ingénierie des technologies (Faisandier, 2014)	31
Figure 25 : Itération et récursivité des processus de définition (Faisandier, 2014)	31
Figure 26 : Vision de l'INCOSE pour 2020 – Transition de l'ingénierie système basée sur les documents vers une ingénierie basée sur les modèles (INCOSE, 2007).....	32
Figure 27 : Grille schématique de la représentation des systèmes (approche traditionnelle) (Fiorèse & Meinadier, 2012).....	35
Figure 28 : Organisation générique d'un modèle « total » du système (Krob, 2012)	35
Figure 29 : Vision classique d'un système formel (Krob, 2012)	36
Figure 30 : Modèle d'intention (en vert) constitutif d'un modèle architectural multi-physique exécutable (Retho, 2015)	37
Figure 31 : Evolution interdisciplinaire de l'Ingénierie Système Basée sur des Modèles (Blochwitz, et al., 2012)	38

Table des figures

Figure 32 : Répartition des tâches de conduite entre des agents techniques ou humains (Millot, Debernard, & Vanderhaegen, 2011).....	40
Figure 33 : Modèle d'un processus d'évaluation d'une situation (Endsley, 1995)	42
Figure 34 : Exemple d'une DSA (Distributed Situation Awareness) (P Salmon, et al., 2008)	42
Figure 35 : Environnement collaboratif d'ingénierie centrée système basée sur des modèles exécutables	43
Figure 36 : Environnement collaboratif de co-intégration système	44
Figure 37 : Environnement de co-spécification exécutable basée sur des modèles.....	47
Figure 38 : Processus de spécification concurrente d'un SYSTEME automatisé	50
Figure 39 : Modèle de référence pour les exigences et les spécifications adaptée de (Gunter, et al., 2000)	50
Figure 40 : Partition des domaines autour du domaine du SYSTEME à faire (Dobre, 2010)	52
Figure 41 : Processus itératif, récursif et concurrent de co-spécification en ingénierie de SYSTEME automatisé	53
Figure 42 : Twin Peaks model – itération entre les espaces problème et solution. Adaptée de (Hall, et al., 2002)	54
Figure 43 : Modèle de référence d'un SYSTEME sociotechnique. Adaptée de (Hall & Rapanotti, 2005)	54
Figure 44 : Proposition d'une organisation d'ingénierie d'un SYSTEME _{Homme-Machine} au travers du processus de co-spécification SYSTEME. Adaptée de (Lieber, 2013).....	55
Figure 45 : Vision moléculaire d'une construction SYSTEME (Mayer, 1995)	56
Figure 46 : Patron essentiel en formalisme FOSM (Fact Oriented System Modeling) (OMG) (G. Morel, et al., 2013)	56
Figure 47 : Systémigramme de définition multi-échelle d'un SYSTEME d'intérêt	58
Figure 48 : Le système vu comme un holon est composé d'un noyau interne et d'une couche externe en « communication » permanente (Boardman, Sauser, & Verma, 2009).....	59
Figure 49 : Interprétation du « Conceptagon » (Boardman, Sauser, John, & Edson, 2009) selon le paradigme holonique	60
Figure 50 : Formalisation du processus de spécification	63
Figure 51 : Processus de co-spécification SYSTEME distribué autour d'un bus	64
Figure 52 : Méthodologie pour la définition du problème selon une vision systémique (Boardman & Sauser, 2008)	65
Figure 53 : Le Module Fonctionnel d'Automatisme dans le cadre CMMS-IAMS. (Pétin, lung, & Morel, 1998)..	68
Figure 54 : Exemple d'expression des exigences pour un agent de maintenance avec l'outil PRIAM.....	68
Figure 55 : Paradigme architectural de Système Interactif d'Aide à la Conduite (Dobre, 2010)	69
Figure 56 : Patron architectural logico-fonctionnel CMMS-IAMS proposé.....	71
Figure 57 : Types de Diagrammes SysML) (OMG, 2012a)	74
Figure 58 : Organisation de l'espace "Quickplace" par domaines d'ingénieries spécialistes.....	76
Figure 59 : Utilisation du bus de co-simulation tout au long du cycle de vie SYSTEME	78
Figure 60 : Environnement de co-modélisation de la plate-forme CISPI	78
Figure 61 : Couplage du modèle de l'environnement au bus de co-simulation	79
Figure 62 : Patron Architectural CMMS logico-fonctionnel visé.....	80
Figure 63 : Patron architectural CMMS-IAMS logico-fonctionnel visé.....	81
Figure 64 : Patron architectural CMMS-IAMS logique visé	82
Figure 65 : Formalisation du problème (P_S) sous la forme d'exigence (R_{S_SysML}) selon la connaissance (K_S) du domaine d'ingénierie opérationnelle	83
Figure 66 : Environnement de co-spécification du procédé de la plate-forme CISPI selon le patron architectural de la partie physique (Figure 64)	83
Figure 67 : Environnement de co-spécification du contrôle-commande de la plate-forme CISPI selon le patron architectural de la partie logique (Figure 64).....	85

Table des figures

Figure 68 : Environnement de co-spécification de la plate-forme CISPI selon le patron architectural du système CMMS-IAMS visé (Figure 64)	86
Figure 69 : Environnement de co-spécification d'une fonction d'actionnement allouée à un agent technique selon le patron architectural d'un actionneur intelligent (Figure 64).....	87
Figure 70 : Environnement de co-spécification d'une fonction de mesure allouée à un agent humain le patron architectural d'un mesureur intelligent (Figure 64).....	88
Figure 71 : Impact du patron de modélisation systémique « Conceptagon » sur le patron architectural CMMS-IAMS visé.....	90
Figure 72 : Patron Architectural CMMS visé en partie 3.....	92
Figure 73 : Diagramme de séquence SysML descriptif du scénario de co-spécification système visé en partie 3	93
Figure 74 : Diagramme d'exigences (req) SysML - Raffinement de l'exigence opérationnelle ($R_{IO\ 1.3}$) par l'espace-solution d'ingénierie système	95
Figure 75 : Modèle orienté flux du procédé CISPI (S_{IPro}) sous forme de schéma graphique standardisé à un niveau général.....	96
Figure 76 : Modèle de procédé orienté flux (S_{IPro}) sous forme de schéma graphique standardisé à un niveau de détail selon la norme (ISO 10628, 2014).....	97
Figure 77 : Modèle orienté flux du procédé CISPI sous forme de diagramme d'activité (act) en langage SysML	98
Figure 78 : Traçabilité entre la <i>spécification</i> descriptive d'ingénierie système (Exigences - R_{IS_Pro}) et la <i>spécification</i> prescriptive d'ingénierie du procédé (Actions - S_{IPro_SysML}).....	100
Figure 79 : Exigence $R_{IS1.5-0}$: Critère de Défaillance Unique	100
Figure 80 : Diagramme d'état (stm) SysML décrivant le « testCase » pour la validation des exigences ($R_{IS1.6}$ et $R_{IS1.7}$).....	102
Figure 81 : Environnement de co-simulation pour la validation de la spécification du procédé (S_{IPro_SysML})	102
Figure 82 : Exigence $R_{IS1.7-0.1}$: Débit d'alimentation en eau de secours	103
Figure 83 : Tétraèdre d'état de la théorie Bond-Graph (Paynter, 1961).....	104
Figure 84 : Système de transformation induit par le tétraèdre d'état sur les parties de l'environnement constituées des flux d'énergies et des flux de puissances (Feliot, 1997).....	107
Figure 85 : Le référentiel T, E, F (Temps, Espace, Forme) permettant de repérer la position des objets soumis à des processus (Décomposition triadique des processus) (Le Moigne, 1994).	107
Figure 86 : Exemple d'une séquence équivalente à un processus de type F. Adaptée de (Feliot, 1997)	109
Figure 87 : Exemple d'une séquence équivalente à un processus de type T. Adaptée de (Feliot, 1997)	110
Figure 88 : Exemple d'une séquence équivalente à un processus de type E. Adaptée de (Feliot, 1997)	110
Figure 89 : Modèle orienté flux énergétique du procédé CISPI sous forme de diagramme de bloc en langage Modelica	114
Figure 90 : Exigence $R_{IS1.7-0.1}$: Performance requise du procédé relative au débit d'alimentation.....	114
Figure 91 : Exigence prescrite par l' <i>espace-solution</i> ingénierie du procédé ($S_{IPro1.0}$) : Hauteur cuve stockage.....	115
Figure 92 : Diagramme de définition de bloc (bdd) SysML - Composition du processus CISPI.....	116
Figure 93 : FlowSpecification de type Puissance.....	117
Figure 94 : Diagramme interne de bloc SysML – Structure du processus CISPI.....	118
Figure 95 : Diagramme paramétrique SysML – Dynamique du processus T.....	120
Figure 96 : Interfaces du modèle Modelica du procédé connectées à des ports "Cosimate" (en orange).....	122
Figure 97 : Première itération - Définition de l'architecture de co-simulation système (<i>Sous-système physique</i>) par l'espace-problème d'ingénierie système	122
Figure 98 : Interface de supervision du déroulement du "TestCase_1.6_1.7" défini dans un "Panel Diagram" Rhapsody.....	123

Table des figures

Figure 99 : Environnement de co-simulation système pour la validation de la spécification du processus de la plate-forme CISPI (S_{IPro_SysML})	123
Figure 100 : Trace d'exécution du « <i>TestCase_1.6_1.7</i> » en co-simulation pour s'assurer de la satisfaction des exigences ($R_{IS1.6}$ et $R_{IS1.7}$)	124
Figure 101 : Diagramme d'exigences ($R_{IS_Aut-Cont}$) relatives à la fonction de contrôle de régulation en puissance d'alimentation en eau de secours	129
Figure 102 : Calcul de la commande en se fondant sur des outils d'estimation algébriques rapides (modèle ultra-locale) et non asymptotiques, sans démarche d'identification classique et décorrélée du procédé à contrôler.	131
Figure 103 : Mise en œuvre systémique de la CSM selon le paradigme architectural CMMS	132
Figure 104 : Boucle de rétroaction en puissance contrôlée par une fonction de conduite intelligente intégrant la CSM	133
Figure 105 : Diagramme fonctionnel hiérarchique Simulink® d'une fonction de contrôle	134
Figure 106 : Description en vision boîte blanche des blocs fonctionnels composant le modèle de contrôle de la partie logique de la plate-forme CISPI	134
Figure 107 : Diagramme de définition de blocs (bdd) - Architecture de la fonction de contrôle	136
Figure 108 : Diagramme interne de bloc (ibd) - Structure interne de la fonction de contrôle	136
Figure 109 : Environnement de co-simulation système pour la validation de la spécification ($S_{IAut-Cont}$) d'une fonction de contrôle du processus de la plate-forme CISPI	137
Figure 110 : Diagramme interne de blocs SysML (ibd) - Définition des interactions entre les modèles de contrôle et physique de la plate-forme CISPI pour la validation par co-exécution de modèles de la fonction de régulation en puissance à travers la voie 1	138
Figure 111 : Trace d'exécution modèle Simulink – Scénario test 1 (Dépassement Puissance Max)	139
Figure 112 : Traces d'exécution modèle Simulink – Scénario test 2 (Détection Défaut Global)	140
Figure 113 : Exigences ($R_{IS_Aut-Comm}$) relatives à la fonction de commande d'alimentation en eau de secours de la plate-forme CISPI	141
Figure 114 : Diagramme de séquence SysML – Scénario d'alimentation en eau de secours du circuit primaire par la plate-forme CISPI au travers de la voie 1 ou de la voie 2	142
Figure 115 : Diagramme de définition de blocs (bdd) - Architecture de la fonction de commande « <i>Uc_Alimenter_Eau_Secours</i> »	143
Figure 116 : Diagramme d'états SysML - Comportement du bloc fonctionnel : "Acter"	145
Figure 117 : Diagramme d'états SysML - Comportement du bloc fonctionnel : "Commander"	146
Figure 118 : Diagramme d'états SysML - Comportement du bloc fonctionnel : "Rendre Compte"	147
Figure 119 : Diagrammes d'états SysML - Modèles comportementaux des acteurs externes du sous-système de commande	148
Figure 120 : Diagramme interne de blocs SysML - Interactions entre le sous-système de commande et le système extérieur (<i>Circuit_Primaire + Sous_Systeme_Controle</i>)	149
Figure 121 : Environnement de co-simulation système pour la validation de la spécification ($S_{IAut-Comm}$) d'une fonction de commande de la plate-forme CISPI	151
Figure 122 : Seconde itération - Définition de l'architecture de co-simulation système (<i>Sous-système logique + Sous-système physique</i>) par l'espace-problème d'ingénierie système	151
Figure 123 : Trace d'exécution de la situation système de conduite d'alimentation en eau de secours Conclusion	152
Figure 124 : Patron architectural CMMS-IAMS logique visé	155
Figure 125 : Répartition de la fonction IAMS entre un agent technique d'actionnement intelligent et un agent humain de mesurage intelligent	156
Figure 126 : Diagramme de séquence (seq) SysML - Scénario de co-spécification d'un système d'actionnement et de mesurage intelligent	157

Table des figures

Figure 127 : Patron architectural d'Actionnement Intelligent par un constituant technique	159
Figure 128 : Principe d'un constituant technique d'actionnement intelligent (G. Morel, 1999)	160
Figure 129 : Processus C de modulation en puissance en sortie de la voie 1 d'alimentation en eau de secours	161
Figure 130 : Vanne de régulation et débitmètre de la voie 1 de la plate-forme CISPI.....	161
Figure 131 : Modèle d'exigences système ($R_{IS_FAI_SysML}$) relatives au constituant technique de modulation de débit	162
Figure 132 : Diagramme d'exigences (req) SysML - Raffinement de l'exigence système (R_{IS_FAI4}) par l'espace-solution fournisseur d'actionneur intelligent	164
Figure 133 : Interprétation du patron architectural d'Actionnement Intelligent pour la modulation en débit à travers la voie 1 de la plate-forme CISPI	166
Figure 134 : Modèle (Simulink) des blocs : « interaction Logico-Technologique », « Acter », « Percevoir », « Agir » et « Rendre-Compte » composant le constituant d'actionnement intelligent.....	167
Figure 135 : Modèle logique (Modelica) du bloc : « interaction technico-physique » composant le constituant d'actionnement intelligent.....	167
Figure 136 : Environnement de co-simulation pour la vérification de la spécification (S_{FAI}) du constituant d'actionnement intelligent de modulation de débit.....	168
Figure 137 : Traces d'exécution de la co-simulation entre le modèle Simulink et Dymola du constituant d'actionnement intelligent.....	169
Figure 138 : Raffinement de l'exigence $S_{IPro1.0}$ à partir de la connaissance K_{FAI4} de l'espace-solution fournisseur d'actionnement intelligent.....	170
Figure 139 : Diagramme de définition de blocs (bdd) - Architecture externe du constituant d'actionnement intelligent de modulation de débit	171
Figure 140 : Diagramme interne de bloc (ibd) - Structure interne du constituant d'actionnement intelligent de modulation de débit	171
Figure 141 : Environnement de co-simulation système pour la validation de la spécification (S_{FAI}) du constituant d'actionnement intelligent de modulation de débit.....	172
Figure 142 : Modèle logique du processus CISPI intégrant la partie physique du constituant d'actionnement intelligent	173
Figure 143 : Spécification (S_{Iphy_SysML}) des interfaces externes du processus CISPI à un niveau d'abstraction logique	173
Figure 144 : Définition de l'architecture de co-simulation système (<i>Bloc d'interaction de détection sonore + bloc logique + bloc physique</i>) par l'espace-problème d'ingénierie système.....	174
Figure 145 : Trace d'exécution du scénario de test pour la validation du constituant d'actionnement intelligent de modulation de puissance	175
Figure 146 : Environnement de co-validation système pour la validation et l'évaluation du niveau de maturité de la spécification (S_{FAI}) du constituant d'actionnement intelligent de modulation de débit	176
Figure 147 : Trace d'exécution du constituant d'actionnement intelligent de modulation de puissance.....	177
Figure 148 : Réalisation de la partie logique du constituant d'actionnement intelligent en tant qu'agent de la plate-forme JADE implémentant le SIAC.....	178
Figure 149 : Intégration du composant d'actionnement intelligent avec le SIAC de la plate-forme CISPI	179
Figure 150 : Patron architectural de Mesurage Intelligent par un Agent Humain.....	181
Figure 151 : Interaction logico-physiologique de détection sonore	183
Figure 152 : Modèle d'exigences système ($R_{IS_phy_SysML}$) relatives au constituant sensoriel de mesurage intelligent	185
Figure 153 : Vue d'ensemble des processus physiologiques de détection sonore constitutifs d'un ensemble d'interactions fonctionnelles (Source/Puits)	186

Table des figures

Figure 154 : Interaction Fonctionnelle ψ entre la source $u'(r')$, unité de structure à la position r' , et le puits $u(r)$, unité de structure à la position r . Puits et source peuvent devenir tour à tour source ou puits (Chauvet, 1995).	188
Figure 155 : Modèle explicatif de l'interaction fonctionnelle : Analogie entre la représentation de Chauvet et un schéma électrique montrant l'importance de la stimulation d'un certain potentiel d'action pour ouvrir les « portes » de propagation du flux d'interaction physico-physiologique (Lieber, et al., 2013)	188
Figure 156 : Plages typiques du champ auditif humain	190
Figure 157 : Exigence physiologique ($R_{IPhy-1.1}$) : plage de perception sonore chez l'humain	190
Figure 158 : Exigence ($R_{IPhy-1.2}$) : Durée minimale alarme sonore.....	191
Figure 159 : Exigence physiologique ($R_{IPhy-1.3}$) : Alignement anthropométrique entre les constituants technique « source » et humain « puits ».....	191
Figure 160 : Exigence physiologique (R_{IPhy-2}) : Intensité signal sonore – bruits de fonds.....	192
Figure 161 : Exigence technique (R_{IPhy-2}) : Intensité signal sonore – bruits de fonds	193
Figure 162 : Bloc Simulink – constituant physiologique « puits » de détection sonore.....	194
Figure 163 : Bloc Simulink – Interaction fonctionnelle de propagation sonore.....	195
Figure 164 : Bloc Simulink – bloc technique « source » d'émission sonore.....	195
Figure 165 : Diagramme Simulink de l'interaction de détection sonore entre un constituant technique « source » et un constituant physiologique « puits ».	196
Figure 166 : Puissance sonore (W) en fonction de la distance « Source/Puits »	196
Figure 167 : Détection de l'alarme sonore en fonction de la fréquence du signal	197
Figure 168 : Détection de l'alarme en fonction du bruit de fond	197
Figure 169 : Diagramme de définition de blocs (bdd) - Architecture externe de l'interaction de détection sonore	198
Figure 170 : Diagramme interne de bloc (ibd) - Structure interne de l'interaction de détection sonore.....	199
Figure 171 : Environnement de co-simulation système pour la validation de la spécification (S_{IPhy}) d'une interaction de détection sonore	200
Figure 172 : Définition de l'architecture de co-simulation système (<i>Bloc d'interaction de détection sonore + bloc logique + bloc physique</i>) par l'espace-problème d'ingénierie système.....	201
Figure 173 : Trace d'exécution du scénario 1 de validation de l'interaction de détection sonore	202
Figure 174 : Trace d'exécution du scénario 2 de validation de l'interaction de détection sonore	203
Figure 175 : Interface de la maquette physiologique d'interaction Physico-Physiologique (configuration de l'interaction de détection sonore d'une alarme technique).....	205
Figure 176 : Maquette physico-physiologique en interface avec la plate-forme CISPI	205
Figure 177 : Généralisation de l'heuristique de co-spécification système étudiée	210
Figure 178 : The System Thinker's Tree (Smith & Daniel-Allegro, 2015)	211
Figure 179 : Interprétation du paradigme systémique par (Galara, 1995)	221
Figure 180 : Spécification des interfaces d'une fonction AMI avec l'outil PRIAM.....	222
Figure 181 : Exemple de listes de requêtes et de comptes rendus (PRIAM)	223
Figure 182 : Spécification comportementale d'un AMI en langage FBD (Bloc Fonctionnel) avec l'outil SPEX	224
Figure 183 : Simulation du modèle comportemental réalisée sur l'outil SPEX	225
Figure 184 : Structuration de l'espace "Quickplace" de co-spécification de la plate-forme CISPI.....	226
Figure 185 : Structuration d'un domaine d'ingénierie en espaces problème et solution et connaissances.....	227
Figure 186 : Structuration de la salle "Co-Spécification" en dossier de spécification entre espaces problème et solution	228
Figure 187 : Diagramme d'exigence SysML - Exigences décrites par l'espace problème d'ingénierie opérationnelle (R_{IO_SysML}).....	229
Figure 188 : Diagramme d'exigences SysML - Raffinement de l'exigence opérationnelle (<i>RIO 1.5</i>) par l'espace-solution d'ingénierie système	230

Table des figures

Figure 189 : Diagramme d'exigences SysML - Raffinement de l'exigence opérationnelle (<i>RIO 1.6</i>) par l' <i>espace-solution</i> d'ingénierie système	231
Figure 190 : Diagramme d'exigences SysML - Raffinement de l'exigence opérationnelle (<i>RIO 1.7</i>) par l' <i>espace-solution</i> d'ingénierie système	232
Figure 191 : Diagramme d'exigences SysML - Exigences et problèmes systèmes ($R_{IS_Pro_SysML}$) relatives au procédé	233
Figure 192 : Spécification des fonctions de transport par les voies V1 et V2 entre la plate-forme CISPI et son environnement	234
Figure 193 : Spécification de la dynamique des fonctions de transport par les voies V1 et V2 selon une fonction identité (<i>l'entrée est égale à la sortie</i>).....	234
Figure 194 : Spécification du procédé CISPI à un niveau fonctionnel (Point de vue Structurel).....	235
Figure 195 : Spécification de flux non atomique (Flow Specification)	243
Figure 196 : Diagramme de définition de blocs (bdd) SysML - "Constraint blocks " utilisés pour la définition du comportement des processus A,T,C	244
Figure 197 : Diagramme de définition de blocs (bdd) SysML - Composition des processus Accumulation, Transport, Conversion du processus CISPI	245
Figure 198 : Diagramme paramétrique (par) SysML – Dynamique processus A.....	246
Figure 199 : Diagramme paramétrique (par) SysML – Dynamique processus C.....	247
Figure 200 : Diagramme interne de blocs SysML : Architecture des modèles d'ingénierie spécialistes pour la validation du modèle de la partie physique de la plate-forme CISPI	248
Figure 201 : Configuration de l'environnement de co-simulation pour la validation du modèle de la partie physique de la plate-forme CISPI : définition des interactions entre les modèles spécialistes au travers des ports de type "Cosimate" selon le diagramme interne de blocs (Figure 200).	249
Figure 202 : Modèle du processus de la plate-forme CISPI avec des ports de type "Cosimate" pour la validation du modèle de contrôle de la partie-logique de la plate-forme CISPI	250
Figure 203 : Modèle de la partie contrôle de la plate-forme CISPI avec des ports de type "Cosimate"	250
Figure 204 : Diagramme interne de blocs SysML : Architecture des modèles d'ingénierie spécialistes pour la validation du modèle de contrôle de la partie logique de la plate-forme CISPI	251
Figure 205 : Configuration de l'environnement de co-simulation pour la validation du modèle de contrôle de la partie logique de la plate-forme CISPI : définition des interactions entre les modèles spécialistes au travers des ports de type "Cosimate" selon le diagramme interne de blocs (Figure 204).....	252
Figure 206 : Structure interne du modèle de commande.....	252
Figure 207 : Modèle de l'environnement de la plate-forme CISPI (circuit primaire) pour la validation du modèle de commande	253
Figure 208 : Modèle de la partie contrôle de la plate-forme CISPI avec des ports de type "Cosimate" pour la validation du modèle de commande	253
Figure 209 : Modèle du processus de la plate-forme CISPI avec des ports de type "Cosimate" pour la validation du modèle de commande	254
Figure 210 : Panel Diagram - Interface de supervision avec les modèles de commande et des acteurs.....	254
Figure 211 : Diagramme interne de blocs SysML : Architecture des modèles d'ingénierie spécialistes pour la validation du modèle de commande de la partie logique de la plate-forme CISPI.....	255
Figure 212 : Configuration de l'environnement de co-simulation pour la validation du modèle de commande de la partie logique de la plate-forme CISPI : définition des interactions entre les modèles spécialistes au travers des ports de type "Cosimate" selon le diagramme interne de blocs (Figure 204)	256
Figure 213 : Diagramme d'exigences (req) SysML - Raffinement de l'exigence système « R_{IS_FAI1} » par l' <i>espace-solution</i> fournisseur d'actionneur intelligent	257
Figure 214 : Diagramme d'exigences (req) SysML - Raffinement de l'exigence système « R_{IS_FAI2} » par l' <i>espace-solution</i> fournisseur d'actionneur intelligent	258

Table des figures

Figure 215 : Diagramme d'exigences (req) SysML - Raffinement de l'exigence système « R_{IS_FAI3} » par l'espace-solution fournisseur d'actionneur intelligent	258
Figure 216 : Modèle Modelica de la partie technique du constituant d'actionnement intelligent pour la vérification de la spécification (S_{FAI}) du constituant d'actionnement intelligent	260
Figure 217 : Modèle Simulink de la partie logique du constituant d'actionnement intelligent pour la vérification de la spécification (S_{FAI}) du constituant d'actionnement intelligent	260
Figure 218 : Configuration de l'environnement de co-simulation pour la vérification du modèle du constituant d'actionnement intelligent de modulation de débit	261
Figure 219 : Modèle de l'environnement de la plate-forme CISPI (circuit primaire) pour la validation du modèle du constituant d'actionnement intelligent de modulation de débit	262
Figure 220 : Modèle du sous-système physique de la plate-forme CISPI (<i>incluant la partie technique du constituant d'actionnement intelligent</i>) avec des ports de type "Cosimate" pour la validation du modèle du constituant d'actionnement intelligent de modulation de débit	262
Figure 221 : Modèle de la partie logique du constituant d'actionnement intelligent pour la validation du modèle du constituant d'actionnement intelligent de modulation de débit	263
Figure 222 : Modèle de la partie commande du sous-système logique de la plate-forme CISPI avec des ports de type "Cosimate" pour la validation du modèle du constituant d'actionnement intelligent de modulation de débit	263
Figure 223 : Modèle de la partie contrôle du sous-système logique de la plate-forme CISPI avec des ports de type "Cosimate" pour la validation du modèle du constituant d'actionnement intelligent de modulation de débit	264
Figure 224 : Diagramme interne de blocs SysML : Architecture des modèles d'ingénierie spécialistes pour la validation du modèle du constituant d'actionnement intelligent de modulation de débit	265
Figure 225 : Modèle ORM de l'interaction de perception pour agir en contexte. L'objet interface affordant (F1 & F2) au centre de la relation de perception (F3 & F4) représente l'élément synergique entre objets hétérogènes techniques et humains (F5) qu'il faut arriver à mesurer (Cette nécessité de mesure est représentée par l'affordance dans l'objet interface)	269
Figure 226 : Modèle ORM de l'interaction de détection sonore entre un objet technique et un opérateur humain, envisagée comme la mise en correspondance d'un percept, son de l'alarme, et d'une propriété cognitive ou connaissance de l'opérateur (Procédure incidentelle ou accidentelle)	270
Figure 227 : Modèle ORM de l'atome élémentaire d'interaction fonctionnelle d'un processus physiologique. L'interaction fonctionnelle émerge de la relation de stimulation entre deux unités structurales et est prescrite in fine par le produit émis par la source u1 ou reçu par le puis u2 qui traverse des discontinuités structurales. De telles propriétés des mécanismes physiologiques conduisent à une structuration de l'organisme vivant en niveaux d'organisation hiérarchique et de ses unités structurales (architecture organique), ainsi que de ces processus physiologiques (architecture fonctionnelle)	271
Figure 228 : Traçabilité entre exigences physiologiques (R_{IPhy}) et exigences systèmes (R_{IS})	272
Figure 229 : Modèle de l'environnement de la plate-forme CISPI (circuit primaire) pour la validation du modèle d'interaction de détection sonore	274
Figure 230 : Modèle de la partie contrôle du sous-système logique de la plate-forme CISPI avec des ports de type "Cosimate" pour la validation du modèle d'interaction de détection sonore	274
Figure 231 : Modèle de la partie commande du sous-système logique de la plate-forme CISPI avec des ports de type "Cosimate" pour la validation du modèle d'interaction de détection sonore	275
Figure 232 : Modèle du sous-système physique de la plate-forme CISPI avec des ports de type "Cosimate" pour la validation du modèle d'interaction de détection sonore	275
Figure 233 : Diagramme interne de blocs SysML : Architecture des modèles d'ingénierie spécialistes pour la validation du modèle d'interaction de détection sonore de la plate-forme CISPI	276

Abréviations

Abréviations

AFIS = Association Française d'Ingénierie Système
AFNOR = Association Française de NORmalisation
AgT = Agent de Terrain
AIPL = Atelier Inter établissement de Productique Lorrain
AN/GV = Arrêt Normal sur GV
AN/RRA = Arrêt Normal sur RRA
ANSI = American National Standards Institute
APE = Approche Par Etat
AMI = Actionnement et Mesure Intelligent
API = Arrêt Pour Intervention
APR = Arrêt Pour Rechargement
ARE = Système d'alimentation normale
ASG = Alimentation de Secours des Générateurs de Vapeur
AQAL = All Quadrant, All Level
BKCASE = Body of Knowledge and Curillicum to Advance Systems Engineering
CE = Chef d'Exploitation
CED = Chef d'Exploitation Délégué
CESAME = Centre d'Excellence Sur l'Architecture, le Management et l'Economie des Systèmes
CISPI = Conduite Interactive et Sûre de Procédés Industriels
CMMS = integrated Control Maintenance and technical Management System
CSM = Commande Sans Modèles
CRAN = Centre de Recherche en Automatique de Nancy
DAST = Direction de la recherche des Automatismes
DER = Direction des Etudes et Recherches
DIAS = Distributed Intelligent Actuators and Sensors
DIN = Direction Ingénierie Nucléaire
DoDAF = Departement of Defence Architecture Framework
DSA = Distributed Situation Awareness
DSE = Délégué sécurité en Exploitation
EDF = Electricité De France
FAI = Fournisseur d'Actionnement Intelligent
FMI = Functional Mockup Interface
FIPA = Foundation for Intelligent Physical Agents
GV = Générateur de Vapeur
HMS = Holonic Manufacturing System
IA = Actionnement Intelligent
IAMS = Intelligent Actuation and Measurement System
IDM = Ingénierie Dirigée par les Modèles
IEEE = Institute of Electrical and Electronics Engineers
INCOSE = INternation COuncil Of System Engineering
IM = Mesurage Intelligent
ISBM = Ingénierie Système Basée sur des Modèles
ISET = Ingénierie des Systèmes Eco-Techniques
ITEA = Information Technology for European Advancement
MBSE = Model Based Systems Engineering
MODAF = Ministry of Defence Architecture Framework

Abréviations

JADE = Java Agent DEvelopment framework
MFA = Module Fonctionnel d'Automatisme
OLF = Objet Logique de Flux
OLI = Objet Logique Interactif
OLE = Object Linking and Embedding
OLT = Objet Logique Technique
OMF = Objet Matériel de Flux
OMG = Object Management Group
OMI = Objet Matériel Interactif
OMT = Objet Matériel Technique
OP = Opérateur de Conduite
OPC = OLE for Process Control
PLM = Product Lifecycle Management
PRIAM = Prenormative Requirements for Intelligent Actuation and Measurement
RCD = Réacteur Complètement Déchargé
REP = Réacteur à Eau Pressurisée
RFLP = Requirement Functional Logical Physical
RP = Réacteur en Production
RRA = Refroidissement du Réacteur à l'Arrêt
RTE = Réseau de Transport d'Electricité / Rupture Tuyauterie d'Eau alimentaire
RTV = Rupture Tuyauterie Vapeur
SA = Situation Awareness
Sdl = Système d'Intérêt
SEBoK = Systems Engineering Body of Knowledge
SIAC = Système Interactif d'Aide à la Conduite
SRL = System Readiness Level
SysML = System Modeling Language
SYMPA = Système de Production Ambient
TMI = Three Mile Island
TRL = Technology Readiness Level
UML = Unified Modeling Language

Introduction générale

Introduction générale :

Les travaux présentés dans ce mémoire de thèse ont été réalisés au sein du département ISET (Ingénierie des Systèmes Eco-Techniques) du Centre de Recherche en Automatique de Nancy (CRAN - CNRS UMR 7039). Les problématiques abordées dans ce mémoire trouvent leur source d'un partenariat académique entre l'équipe ISET et EDF au sein du cluster CONNEXION² (CONtrôle Commande Nucléaire Numérique pour l'EXport et la rénovatiON), et précédemment, d'un long partenariat au sein de programmes européens de R&D dans le domaine de l'énergie.

Par ailleurs, le constat à **postériori** de défaillances systémiques ayant conduit à des situations incidentelles ou accidentelles de systèmes industriels complexes soulève la question des relations de causalité du comportement d'ensemble des éléments constitutifs d'un « système-produit³ » sur le comportement individuel de chacun de ces éléments et inversement.

*The reality is that systems do not exist in isolation... Systems are also parts, and as such, they inhabit worlds of systems⁴ ..., which are largely unknown to us and we discover their existence all too tragically via systemic failure **Is it possible using systemic thinking as the natural antidote of systemic failure?** (Boardman & Sauser, 2013b).*

Ce constat montre que nous prenons conscience de façon courante d'un «TOUT» par ses effets que nous désignons par la matérialité fonctionnelle d'une « PARTIE » afin de le rendre tangible. « Ce qu'est un système ? » demeure ainsi un questionnement récurrent dans de nombreuses communautés scientifiques, y compris celle de l'« **Ingénierie-Système** » dans laquelle nous positionnons nos travaux. Cette communauté se réfère pour « Penser-Système » à un ensemble de travaux relatifs à une « **Théorie Générale des Systèmes** » (Von Bertalanffy, 1968) que (Pouvreau, 2013) a récemment actualisée dans un cadre de « **systémologie générale** ».

En réponse au questionnement conceptuel suscité par la relation récursive de couplage (Figure1) entre les domaines de la situation-système et de l'ingénierie-système, nous postulons dans nos travaux que la cause de certaines défaillances de ces systèmes critiques peut provenir de l'organisation de leur processus collaboratif d'ingénierie interdisciplinaire. Nous avons considéré une perspective holonique permettant de rendre compte de ces comportements perçus, requis, visés et produits « *partiellement comme une **totalité H** ou totalement comme une **partie h*** » (Koestler, 1967) afin de prendre en compte la dimension subjective de la réalité d'une situation-système tant au niveau collectif qu'individuel.

² <https://www.cluster-connexion.fr/>

³ Système Produit : A system context for which the system-of-interest (Sol) is a product (Pyster, et al., 2012). Il s'agit de l'artefact « ingéniéré » délivré par un système « ingéniérant » afin de produire un « système d'intérêt » requis par une situation-système.

⁴ Avec de plus en plus la nécessité de prendre en compte les « systèmes-produits » par la nature, qui ne font pas l'objet de ce mémoire, bien que certains éléments constitutifs du « système à faire » soient « naturels »

Introduction générale

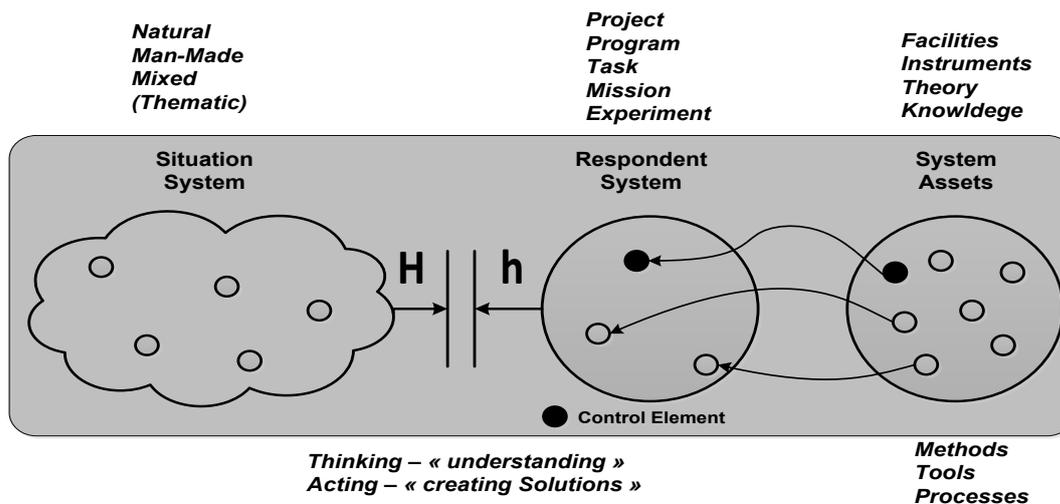


Figure 1 : Interprétation du diagramme de couplage système (HW Lawson, 2010)

En réponse au questionnement méthodologique sous-jacent au « système pour faire », nous avons interprété divers travaux de l'approche des « problem-frames » en explorant la nature **spécifiante**, **interdisciplinaire** et **itérative** de cette relation récursive de couplage (Figure 2) afin de prendre en compte la dimension objective de la réalité⁵ d'une architecture-système tant au niveau collectif qu'individuel.

Cette heuristique de modélisation forme deux visions architecturales du « système à faire⁶ » reflétant :

- Partiellement :
 - la connaissance K_S d'une totalité H d'une situation réelle afin de satisfaire la requête R_S d'un « système à faire » M_H selon : $K_S, M_H \vdash R_S$
 - les connaissances K_s de ses parties h dans la réalité de la situation afin de satisfaire la requête R_s d'éléments constitutifs M_h selon : $K_s, M_h \vdash R_s$,
- Totalemment :
 - la connaissance systémique K_H d'un « système à faire » afin de satisfaire la requête R_H d'une faisabilité M_I selon : $K_H, M_I \vdash R_H$,
 - les connaissances interdisciplinaires K_I de « constituants à faire » M_h afin de satisfaire la requête R_I d'intégration d'un ensemble de faisabilités M_h selon : $K_I, M_h \vdash R_I$.

⁵ Requirements R are located in the reality and the entailment relationship $K, S \vdash R$ means that a proof can be given that an implementation of a specification S, introduced into a knowledge domain K, will guarantee satisfaction of the requirements R (interpretation recursive of (Gunter, Gunter, Jackson, & Zave, 2000) works).

⁶ Système à faire : système étudié par l'ingénierie système pour répondre au besoin (R). Le « système à faire » est initialement un concept, une abstraction, le résultat concret de sa réalisation est un « produit » (produit-système) ayant les caractéristiques d'un système et répondant à une définition qui en précise toutes les caractéristiques techniques, de production, d'exploitation de maintenance. (Fiorèse & Meinadier, 2012)

Introduction générale

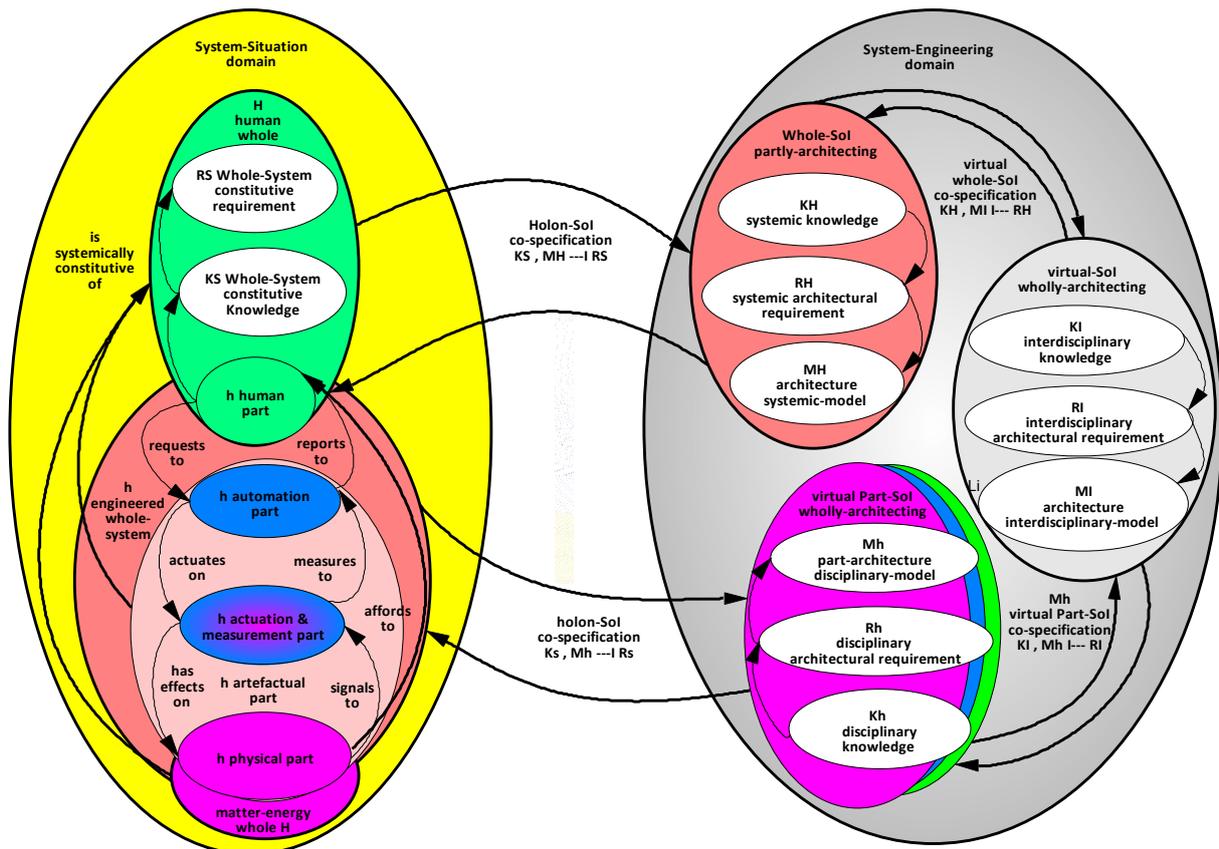


Figure 2 : Systémigramme explicatif des relations TOUT et PARTIE de notre heuristique de co-spécification exécutable basée sur des modèles d'un système d'intérêt

En ce sens, nous avons tiré parti de la maturité récente des technologies de modélisation et de simulation numériques facilitant le **couplage de modèles** entre l'ensemble des domaines d'ingénierie constitutifs d'un processus d'« **Ingénierie Système Basée sur des Modèles** ». La technologie mise en œuvre s'appuie sur le langage de modélisation système « **SysML** » pour le partage de connaissances ainsi que la vérification et la validation par co-exécution de modèles de la spécification virtualisée d'un système d'intérêt faisable (M_i) autour d'un bus de co-simulation, y compris in-situ avec notre plate-forme d'expérimentation.

*A **paradigm shift** is occurring within Systems Engineering, where the level of complexity of system-projects can only accurately and precisely be modeled by a modeling construct that is **executable**. **Whole-system** design means optimizing not just parts but the entire system. Everything must be considered simultaneously and teased apart to reveal mutually helpful interactions (Garcia, 2009).*

Cependant, cette heuristique de modélisation sous-tend un processus cognitif de co-spécification interdisciplinaire entre l'ensemble des parties-prenantes afin de faciliter la construction « par détours » (Berthoz, 2014) d'une architecture-système réaliste.

*Penser l'intégration d'un système complexe hétérogène, résultant de l'interaction de plusieurs systèmes homogènes, nécessite par conséquent de **raisonner transversalement en construisant des modèles d'un type nouveau** qui capturent l'émergence en intégrant de manière cohérente les parties de chaque modèle homogène constitutif d'un modèle systémique d'ensemble. Or force est de constater que rien ne nous prépare à ce nouveau paradigme qu'est le raisonnement systémique, qui oblige à mettre en relation des savoirs de natures extrêmement différentes et à transcender les silos traditionnels d'organisation de la connaissance (Krob, 2012).*

Introduction générale

Notre proposition d'environnement collaboratif (Figure 3) a ainsi pour objectif de faciliter le travail interdisciplinaire en intégrant l'ensemble des environnements disciplinaires requis de co-modélisation M_h de parties-système, avec pour objectif assigné de préserver les outils, méthodes et processus de travail de chacune des parties prenantes.

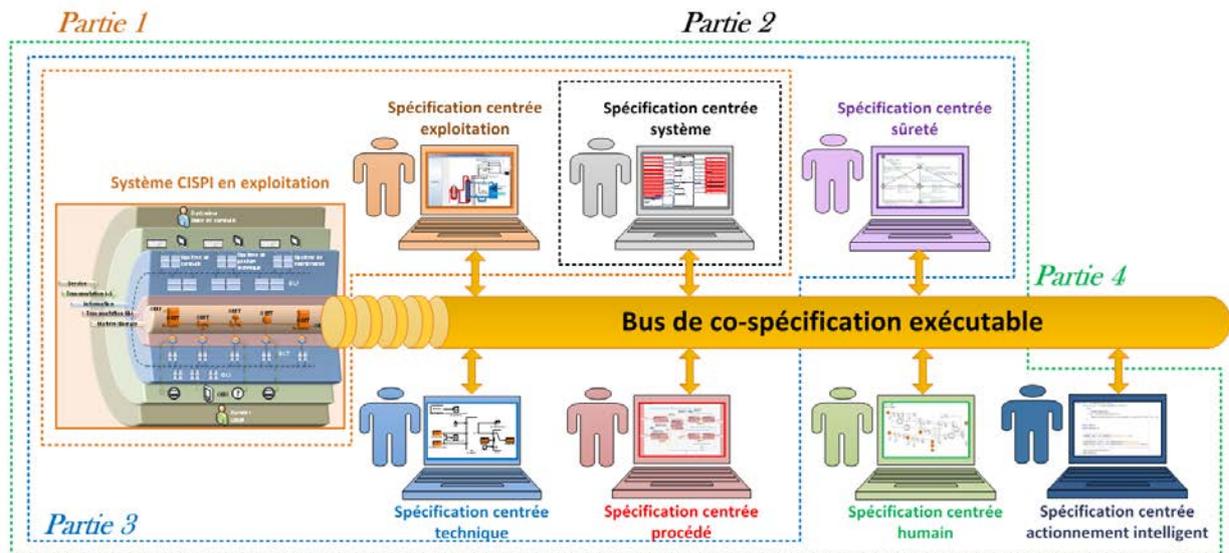


Figure 3 : Proposition d'un environnement de co-spécification système exécutable basée sur des modèles

Enfin, afin que nous puissions jouer le rôle d'architecte-système pour valider notre proposition, notre environnement cognitif de travail est lui-même constitué d'un ensemble d'experts⁷ qui, à titres divers, nous ont permis de couvrir la dimension interdisciplinaire de modélisation et d'ingénierie système de notre étude de cas.

La structuration de notre mémoire reflète la perspective holonique TOUT et PARTIE visée que nous limitons dans cette introduction générale au couplage des quatre parties constitutives pour en expliquer la logique d'ensemble que complètent une conclusion générale, une bibliographie ainsi qu'une annexe détaillant les différents modèles. Chacune de ces parties cible une interaction constitutive de la dimension collaborative d'ingénierie d'un système d'intérêt, limité au facteur d'échelle de la situation-système de notre cas d'étude.

Les deux premières parties reflètent partiellement les collaborations interdisciplinaires à viser pour la construction d'un **modèle partiel M_h de notre situation-système d'intérêt**.

La **première partie**, intitulée « **Contexte opérationnel et d'ingénierie interdisciplinaire du système de conduite CISPI (Conduite Interactive et Sûre de Procédés Industriels)** », cible une interaction collaborative entre métiers d'exploitation et d'ingénierie constitutive de la situation du système à faire. Elle contextualise en deux chapitres notre situation-système de Recherche & Développement qui reflète la problématique industrielle visant une architecture de type PLM (Plant Life cycle Management) afin d'assurer un continuum d'informations entre actifs-techniques et actifs-humains en situation opérationnelle aussi bien que d'ingénierie d'un système de conduite d'un procédé industriel. Cette exigence infère un continuum collaboratif de modélisation (« Model-in-the-loop ») et de connaissances (« Knowledge-in-the loop ») entre les domaines courants

⁷ Académiques : C. Join, R. Pannequin, F. Mayer, D. Mery, P. Marangé, D. Gouyon et industriels : J.M. Dupont, J.P. Hennebicq, D. Galar

Introduction générale

d'ingénierie centrée technique ou centrée humain pour concourir véritablement à une ingénierie centrée système (« System-in-the-loop »).

La **seconde partie**, intitulée « **Environnement de co-spécification exécutable basée sur des modèles du système de conduite CISPI** », cible une interaction collaborative entre domaines d'ingénierie interdisciplinaire constitutive du « système pour faire ». Elle approfondit les fondements scientifiques de notre heuristique de modélisation-système pour produire l'ensemble des modèles descriptifs de problèmes R_s, R_H, R_h et prescriptifs de solutions M_H, M_b, M_h dans une perspective holonique TOUT (H) et PARTIE (h) du système d'intérêt requis. L'architecture collaborative proposée vise à faciliter le couplage non linéaire de l'ensemble de connaissances à percevoir, à requérir et à intégrer K_s, K_H, K_b, K_s d'un point de vue systémique.

Les deux premières parties détaillent certaines collaborations interdisciplinaires ciblées pour la construction d'un **modèle total M_i de faisabilité virtuelle de notre système d'intérêt « h engineered whole-system »** dépassant une modélisation technique artefactuelle (« **h artefactual part** »).

La **troisième partie**, intitulée « **Co-spécification exécutable de constituants de conduite du procédé du système CISPI** », cible une interaction constitutive de parties physiques (« **h physical part** ») et automatisation (« **h automation part** ») du système ingénieré visé. Elle met en évidence dans un premier temps la difficulté de prendre en compte de façon plus large la dimension multi-physique de la matière-énergie (« **H matter-energy whole** ») à contrôler. Cette faisabilité physique préliminaire est contrôlée dans un deuxième temps par une logique de contrôle continu et par états ne nécessitant pas d'identification a priori d'une structure existante afin de faciliter des choix d'alternatives de conduite, par exemple en terme de sûreté de fonctionnement ou de maintenance prédictive.

La **quatrième partie**, intitulée « **Co-spécification exécutable de constituants d'actionnement et de mesurage de conduite du système CISPI** », cible une interaction constitutive de parties d'actionnement et de mesurage intelligents (« **h actuation and measurement part** ») raffinant le modèle exécutable en cours de spécification. Si, dans un premier temps, un constituant-système embarquant une forme d'intelligence technique est spécifié, une attention particulière est portée dans un deuxième temps sur la possibilité de co-spécifier partiellement un modèle exécutable d'une interaction technico-physiologique de conduite (« **human-part** » & « **automation-part** »).

En conclusion, nous présentons un bilan de ces travaux qui ont reçu, par certains aspects, un écho favorable tant d'un point de vue industriel (Bouffaron, 2014) que scientifique (Bouffaron, Dupont, Mayer, & Morel, 2014) et pédagogique (Gouyon, Bouffaron, & Morel, 2014), (G. Morel, et al., 2014). Ces travaux n'en restent pas moins exploratoires pour contribuer à pallier :

- l'approche guidée par des processus qui a longtemps prévalu en Ingénierie-Système mais qui montre ses limites en termes de partage objectif de connaissances,
- l'approche basée sur des modèles qui fait l'objet de nombreux travaux techniques mais qui nécessite de mieux prendre en compte la dimension subjective de la réalité pour traduire l'intention d'un architecte-système (Retho, 2015).

C'est à ce verrou, au facteur d'échelle de notre environnement d'expérimentation, que sont attachés nos travaux en faisant du **modèle exécutable** le pivot d'une collaboration interdisciplinaire de co-spécification d'un système d'intérêt sans chercher à appliquer un cadre reconnu mais plutôt en suscitant une nouvelle voie.

Partie 1 : Contexte opérationnel et d'ingénierie interdisciplinaire du système de conduite CISPI

Introduction : Interaction collaborative entre métiers d'exploitation et d'ingénierie constitutive de la situation-système d'intérêt ciblée

Le cluster CONNEXION a pour ambition de proposer et de valider une architecture innovante de plateformes modulaires de contrôle-commande adaptée aux centrales nucléaires en France et à l'international. Cette architecture « vise à orchestrer de façon dynamique autour d'un bus d'objet métier, des réseaux de services dans l'espace et dans le temps à partir de sources d'informations hétérogènes, centralisées ou réparties, de qualité et de sensibilité différentes pour offrir aux métiers en tout temps et en tout lieu de la centrale des services dont ils ont besoin » (Devic & Morilhat, 2013). Elle contribue notamment à pallier la dichotomie courante entre les métiers d'exploitations et d'ingénierie. Une problématique émergente consiste alors à assurer un continuum depuis la conception, jusqu'à l'exploitation et la formation, afin de faciliter l'acquisition de données, les échanges et les analyses entre les différentes parties prenantes conceptrices et utilisatrices (Figure 4).

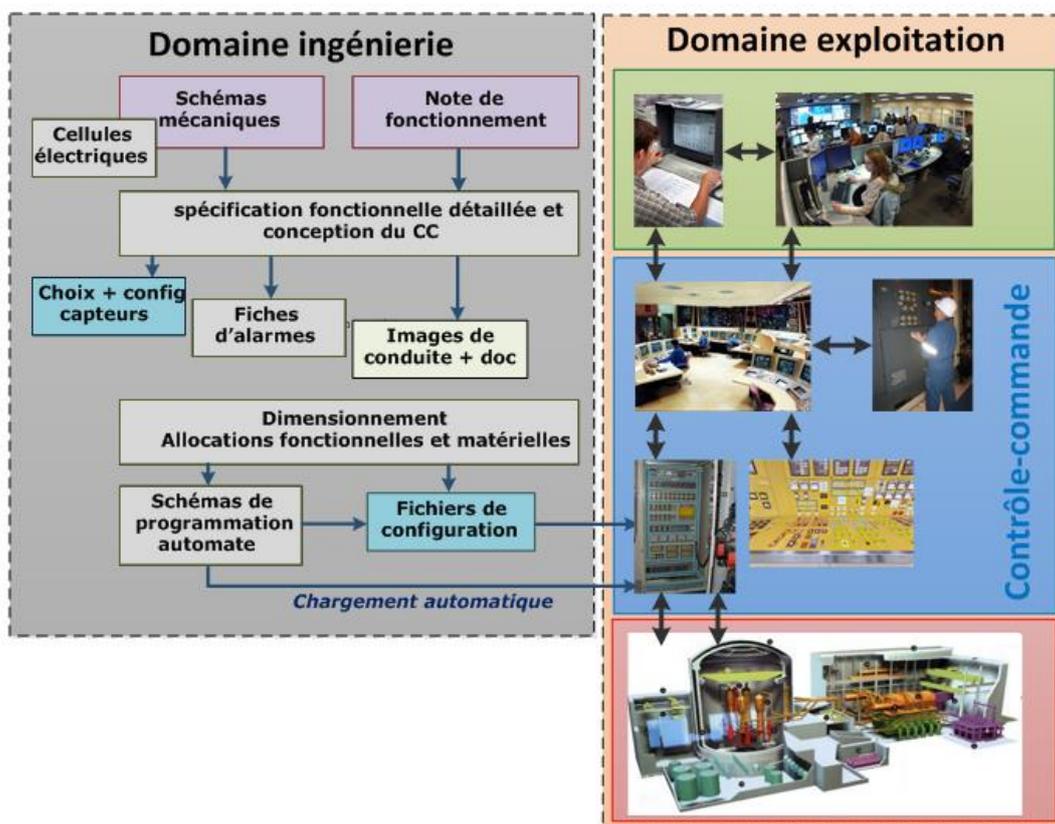


Figure 4 : Domaine d'ingénierie et d'exploitation d'un système de conduite (Devic & Morilhat, 2013)

En ce sens, l'objectif des deux chapitres de cette première partie est de contextualiser à la fois le domaine opérationnel de conduite du procédé industriel critique en exploitation, ainsi que le domaine d'ingénierie pour concevoir ce type de système.

Ainsi, le premier chapitre de notre mémoire précise notre domaine d'intérêt en détaillant la situation système de conduite d'un procédé industriel critique dans le domaine de l'énergie électrique. Une caractéristique essentielle de la conduite de ce type de procédé, siège d'émergences critiques, est qu'elle reste

Partie 1 : Contexte opérationnel et d'ingénierie interdisciplinaire du système de conduite CISPI

majoritairement sous un contrôle humain (Devic & Morilhat, 2013), dont les métiers sont répartis en salle de commande, sur le terrain, dans les laboratoires... Nous caractérisons ensuite les évolutions requises de l'architecture de conduite existante pour évoluer vers une architecture de conduite distribuée afin que les opérateurs puissent interopérer numériquement en tout lieu, à tout instant et pour toute action de conduite avec le procédé à contrôler

Le second chapitre, caractérise un ensemble de pratique en ingénierie de conduite centrée technique et centrée humain, pour défendre qu'une approche centrée système est requise pour spécifier ce type de système afin d'assurer la cohérence globale du continuum d'informations entre les agents techniques et humains. Nous statuons également sur l'utilisation de technologies de modélisations numériques, de plus en plus matures, pour la mise en œuvre de notre approche heuristique de co-spécification système basée sur des modèles exécutables.

Partie 1 : Contexte opérationnel et d'ingénierie interdisciplinaire du système de conduite CISPI

1. Chapitre 1 : Contexte opérationnel de conduite du système à faire CISPI

1.1. Introduction : Caractérisation de la situation-système de conduite CISPI

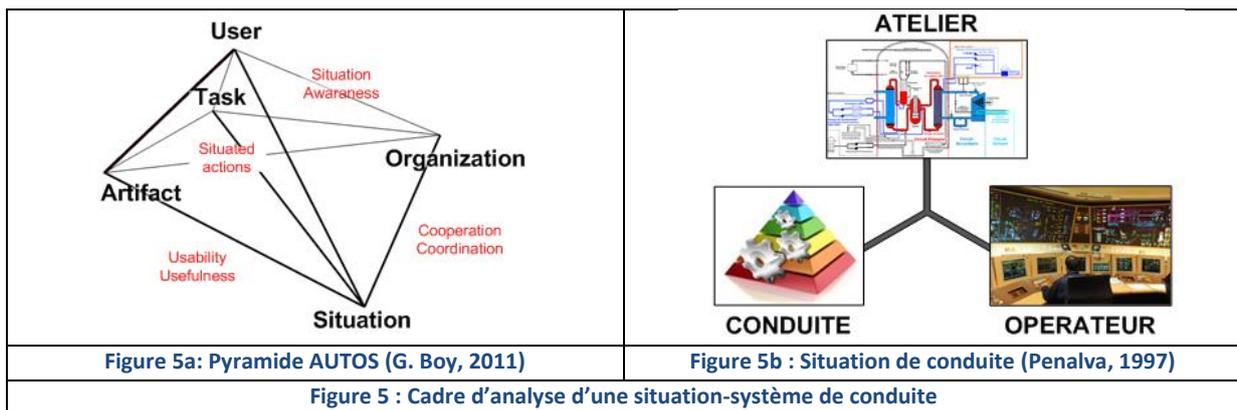
Dans un premier temps, nous caractérisons dans ce chapitre la situation système de conduite du procédé industriel critique faisant l'objet de nos travaux :

- d'un point de vue dynamique (*évolution du procédé au cours du temps*)
- d'un point de vue cognitif (*opérations de conduite pour maintenir le procédé dans un état donné*)

Dans un second temps, nous détaillons l'architecture de conduite existante par niveaux de hiérarchisation afin de faire émerger ses limites, notamment dans le partage d'informations entre les opérateurs de conduite répartis à la fois en salle de commande et sur le terrain. Nous présentons ensuite l'architecture de conduite visée, mise en œuvre dans notre cas d'étude (*plate-forme CISPI du CRAN*), permettant d'assurer un continuum d'information entre les agents humains, mais également les agents techniques de conduite

1.2. Caractérisation de la situation-système de conduite du procédé industriel critique d'intérêt

Nous basons notre étude sur un ensemble de travaux (G. Boy, 2011) et (Galara, 2011) statuant sur la notion de « systèmes en situation complexe » (Penalva, 1997). En ce sens, nous caractérisons dans un premier temps la situation dynamique à laquelle les opérateurs de conduite doivent s'adapter pour répondre, en exploitation, à un double objectif de production d'énergie (définis par le RTE (*Réseau de Transport d'Electricité*)) et de sûreté. Dans un second temps nous caractérisons la situation cognitive au cours de laquelle ces opérateurs se construisent une représentation de la situation dynamique, pour décider et agir sur cette dernière.



1.2.1. Caractérisation de la situation dynamique de conduite

Notre situation de conduite du procédé industriel critique présente la caractéristique essentielle d'être une situation dynamique. En effet, le procédé nucléaire à conduire repose sur une réaction en chaîne⁸, évoluant de

⁸ Dans le domaine du nucléaire, une **réaction en chaîne** se produit lorsqu'un neutron cause la fission d'un atome fissile produisant un plus grand nombre de neutrons qui à leur tour causent d'autres fissions.

Partie 1 : Contexte opérationnel et d'ingénierie interdisciplinaire du système de conduite CISPI

manière continue sans interruption et indépendamment des actions de l'homme et du système technique (Palaci, 2009), c'est-à-dire en fonction de la dynamique interne du procédé (en l'occurrence la réaction en chaîne). L'exploitation de ce procédé nécessite de modérer et de contrôler cette réaction afin d'éviter la fusion du cœur du réacteur, pouvant se produire en particulier lorsque ce dernier cesse d'être correctement refroidi. La fusion du cœur est considérée comme un accident nucléaire grave en raison de la probabilité de dispersion de substances radioactives et de contamination de l'homme et de l'environnement. En ce sens, le procédé nucléaire est un procédé critique, dont la sûreté repose sur le maintien de trois fonctions principales de sûreté :

Fonction 1	<i>Contrôler la réaction en chaîne, pour garantir le non emballement ou toute excursion de puissance thermique d'amplitude et/ou de durée excessive</i>
Fonction 2	<i>Maintenir le refroidissement du combustible en toute circonstance, par évacuation de la puissance produite, y compris après l'arrêt du réacteur</i>
Fonction 3	<i>Confiner les produits radioactifs par le maintien des trois barrières étanches (la gaine des crayons combustibles, l'enveloppe du circuit primaire et l'enceinte de confinement)</i>

Tableau 1 : Principales fonctions de sûreté d'une centrale nucléaire

Dans ce mémoire nous nous focalisons sur le maintien de la fonction n°2 de sûreté concernant le refroidissement du combustible des réacteurs de technologie REP (Réacteur à Eau Pressurisée) de type 1300 MWe. Cette exigence doit être satisfaite en permanence, aussi bien pendant la marche du réacteur, qu'après son arrêt normal ou accidentel. Bien qu'il soit possible de stopper la fission nucléaire⁹, le danger d'une fusion du combustible contenu dans le cœur du réacteur subsiste pendant des jours et même des semaines. En effet, l'activité des produits de fission continue de produire de la chaleur même après l'arrêt de la réaction. Ainsi, un des enjeux majeurs des REP concerne le refroidissement de la chaleur, afin d'éviter une montée en température excessive du réacteur pouvant entraîner la fusion du cœur.

En exploitation, l'évacuation de l'énergie d'un REP est assurée par trois circuits indépendants où circule de l'eau servant de fluide caloporteur chargée de transporter la chaleur du cœur entre ces différents circuits (Jacquemin, 2013) (Figure 6):

- Le circuit primaire permet de refroidir le cœur du réacteur par une circulation d'eau utilisée sous une pression suffisamment élevée pour rester liquide (155bars) à sa température de fonctionnement (300°C)
- Le circuit secondaire évacue l'énergie du circuit primaire par l'intermédiaire des Générateurs de Vapeur (GV).
- Le circuit tertiaire comporte un condenseur refroidissant l'eau du circuit secondaire, évacuant ainsi l'énergie restante vers une rivière, un fleuve, la mer ou dans l'atmosphère par des tours de réfrigérations

En cas d'indisponibilité du système d'alimentation normale (ARE) en situation incidentelle ou accidentelle de type (*Rupture Tuyauterie d'Eau alimentaire (RTE)*, *Rupture Tuyauterie Vapeur (RTV)*, ...) l'alimentation en eau des GV bascule sur le système de sauvegarde d'Alimentation en eau de Secours des Générateurs de vapeur (ASG). La mission du système ASG est d'alimenter en eau la partie secondaire du GV afin de maintenir un

⁹ La réaction nucléaire peut être stoppée en faisant chuter les grappes de barres de contrôle dans le cœur du réacteur et en injectant de l'acide borique dans l'eau où est immergé le combustible

Partie 1 : Contexte opérationnel et d'ingénierie interdisciplinaire du système de conduite CISPI

niveau d'eau suffisant à l'intérieur pour continuer à refroidir le circuit primaire. Il extrait alors la puissance résiduelle du cœur jusqu'à ce que les conditions de mise en service du système de Refroidissement du Réacteur à l'Arrêt¹⁰ (RRA) soient atteintes (Coppolani, 2004). Pour les réacteurs de type 1300 MWe, le système ASG est également utilisé en fonctionnement normal durant les phases d'arrêt et de démarrage du réacteur nucléaire pour le remplissage des GV. Le système ASG assure ainsi une des onze fonctions principales d'une centrale nucléaire, participant à la fonction de sûreté de refroidissement. Ce système critique, dont une défaillance peut entraîner une dégradation importante du combustible, constitue l'Artefact¹¹ à conduire de notre situation d'intérêt.

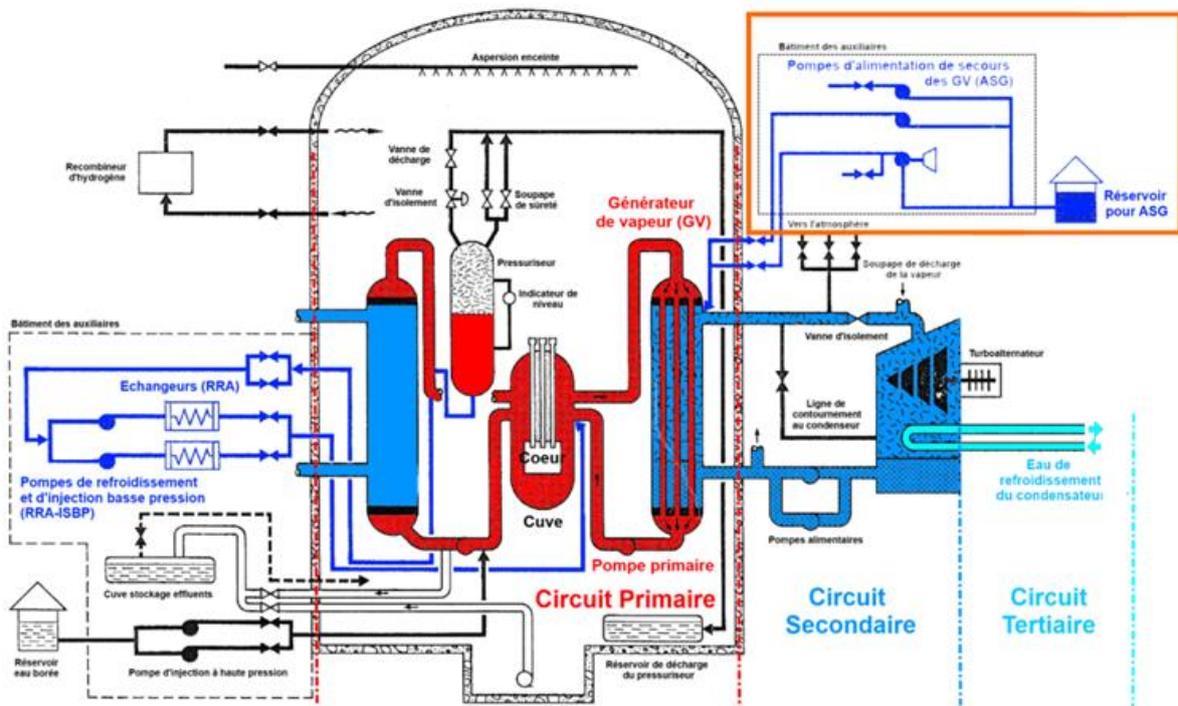


Figure 6: Principaux circuits de refroidissement d'un REP (adaptée de (Duco, 2004))

1.2.2. Caractérisation de la situation cognitive de conduite

Système socio-technique

La maîtrise de cette situation dynamique, siège d'émergences critiques, reste majoritairement sous un contrôle humain (Devic & Morilhat, 2013), quel que soit le niveau d'automatisme.

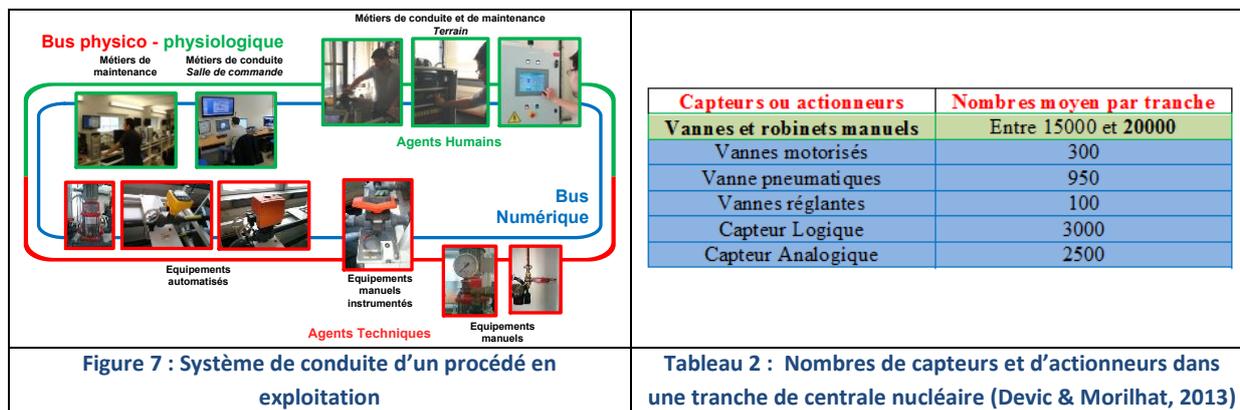
¹⁰ Le système RRA a pour fonction, lors d'une mise à l'arrêt normal du réacteur, d'évacuer la chaleur résiduelle produite par le combustible dans la cuve du réacteur et de maintenir l'eau primaire à une température modérée tant qu'il y a du combustible dans le cœur du réacteur. En effet, après l'arrêt de la réaction en chaîne, le cœur du réacteur continue de produire de la chaleur qu'il est nécessaire d'évacuer pour ne pas risquer d'endommager gravement le combustible (Medjaher, 2005)

¹¹ Un Artefact est un objet matériel ou immatériel (conceptuel) conçu par l'homme, utile pour une classe d'utilisateurs, afin d'effectuer des tâches spécifiques (HB Lawson, Wade, & Hofkirchner, 2005-2014)

Partie 1 : Contexte opérationnel et d'ingénierie interdisciplinaire du système de conduite CISPI

« Bien que certains se font des illusions ou que d'autres continueront à s'en faire sur le mythe de l'entreprise complètement automatisée, l'homme est, et restera longtemps encore, seul capable d'animer des activités dans l'entreprise. Seule la nature du travail évoluera ». (Després, 1991)

Cela s'explique par la nature résiliente de l'humain capable de s'adapter et de faire face à des situations inattendues, relatifs au caractère imprévisible et évolutif du procédé nucléaire à piloter. (Hollnagel, 2006) présente la résilience comme étant la caractéristique la plus importante des systèmes et organisations orientés sûreté. De plus, bien que ces métiers soient assistés à différents degrés par des technologies numériques, un pourcentage faible des informations de conduite est « automatisé ». En effet, pour des exigences techniques et de coûts, il n'est pas possible d'automatiser l'ensemble des équipements d'une installation nucléaire. Ainsi, on estime à plus de 80% la part d'informations provenant d'un réseau de traitement via un opérateur ou le plus souvent de l'opérateur lui-même (en salle de commande, sur le terrain, laboratoire de chimie, maintenance...) (Figure 7). A titre d'illustration, plus de 91 % des vannes et robinets présents dans une tranche¹² de centrale nucléaire sont des équipements manuels (Tableau 2) que les agents de terrain manipulent durant les opérations de conduite.



Ces agents humains interagissent avec le procédé d'une part, via les informations et les moyens techniques disponibles en salle de commande, et d'autre part, en parcourant le site de production d'énergie électrique pour remonter un ensemble d'informations concernant l'exploitation de la centrale et non disponibles en salle de commande mais également pour agir sur des équipements non contrôlables à distance. Pour cela ils utilisent leur appareil musculo-squelettique pour actionner les équipements (*vannes, robinets, disjoncteurs,...*), ainsi que leur appareil sensoriel pour observer les phénomènes. Un agent de terrain, vu alors comme : « les yeux et les oreilles » des opérateurs en salle de commande utilise :

- le **toucher** pour percevoir les vibrations d'une pompe en fonctionnement, actionner les vannes manuelles (Figure 8b),...
- l'**ouïe** pour percevoir les « gargouillis » de l'eau dans une canalisation, le sifflement de l'air lors d'opérations d'événages, une alarme en salle de commande ou sur le terrain,...
- la **vue** pour percevoir un niveau d'eau dans une cuve, un voyant (Figure 8a), un afficheur analogique/numérique (Figure 8c) ...

¹² La tranche est l'unité de production qui réunit l'ensemble des installations permettant de produire l'électricité à partir du combustible primaire. Elle regroupe donc le bâtiment réacteur, le bâtiment combustible, la salle des machines et une ou plusieurs tours de refroidissement. (www.lenergieenquestions.fr/)

Partie 1 : Contexte opérationnel et d'ingénierie interdisciplinaire du système de conduite CISPI



En exploitation, l'équipe de conduite a pour mission première de garantir un haut niveau de sûreté, en maintenant l'installation dans le domaine de fonctionnement défini par les Spécifications Technique d'Exploitation (STE). En parallèle, l'équipe doit également assurer l'adaptation du point de fonctionnement de l'installation aux besoins du réseau. En situation normale, l'activité des opérateurs se caractérise par deux grands types de Tâches à effectuer : surveiller quotidiennement l'installation pour détecter et diagnostiquer les anomalies de fonctionnement et effectuer les manœuvres d'exploitation nécessaires à la conduite et aux opérations de maintenance. En situation dégradée, leur mission est de diagnostiquer les situations incidentelles ou accidentelles. Le cas échéant, les équipes doivent replier l'installation dans l'état le plus sûr de fonctionnement, tout en minimisant les conséquences radiologiques et la dégradation du matériel à partir des procédures.

Approche Par Etats

« A l'origine les procédures de conduite étaient fondées sur une pure approche évènementielle » (Appell & Chambon, 1998). Cette approche prévoyait une identification préalable des évènements initiateurs pouvant conduire à un incident ou à un accident afin d'adopter la procédure de conduite la plus appropriée. Ces procédures sont élaborées à partir du déroulement prévisible de l'incident ou de l'accident et sont applicables si les évènements initiateurs, pouvant conduire à la situation dégradée, ont été correctement diagnostiqués. Le retour d'expérience de l'accident de « Three Miles Island-2¹³ » a montré la nécessité d'une évolution de cette approche évènementielle. En effet, comme le souligne (Birraux, Bataille, & Sido, 2011), cette approche présente plusieurs inconvénients majeurs lié à la difficulté, voire à l'impossibilité, de prévoir tous les problèmes pouvant survenir sur une centrale, notamment dans le cas où plusieurs seraient concomitants et indépendants. De plus, le risque d'un mauvais diagnostic ou d'un diagnostic partiel des sources du problème est important, et ce, pour des raisons qui peuvent être d'origine humaine comme technologique (par exemple dans le cas de mauvaises informations fournies aux opérateurs : *Lors de l'accident de TMI-2, les voyants n'indiquaient que l'effectivité de l'envoi de l'ordre et non son exécution. Ainsi, la vanne de vidange du circuit primaire est apparue fermée aux opérateurs en salle de commande alors qu'elle était en fait ouverte. Cela a conduit à l'assèchement quasi complet de la cuve du réacteur, et une des causes principales de la fusion partielle du cœur*). Enfin cette approche rend très difficile l'évolution de la stratégie de pilotage dans le cas où les paramètres physiques de celle-ci n'évolueraient pas comme prévu. L'ensemble de ces problèmes et leur

¹³ L'accident de Three Man Island (TMI) s'est produit le 28 mars 1979 : A la suite d'une chaîne d'évènements accidentels, le cœur du réacteur n°2 de la centrale de Three Mile Island (TMI-2) a en partie fondu, entraînant le relâchement dans l'environnement d'une faible quantité de radioactivité (Ducro, 2004)

Partie 1 : Contexte opérationnel et d'ingénierie interdisciplinaire du système de conduite CISPI

impact potentiellement très aggravant a conduit, dans le cadre des conditions post TMI-2, à l'abandon de l'approche événementielle pour l'exploitation des centrales nucléaires françaises.

En ce sens, EDF et Areva (Framatome à l'époque) ont proposé une nouvelle approche pour pallier aux problèmes de l'approche événementielle : l'Approche Par Etat (APE). L'APE, à partir de la connaissance de l'état physique du réacteur et de la disponibilité du matériel, permet de définir la stratégie de conduite à adopter, puis les actions à mener, sans avoir à identifier la séquence d'évènements antérieurs (initiateurs et aggravants) ayant conduit à cet état (Figure 9).

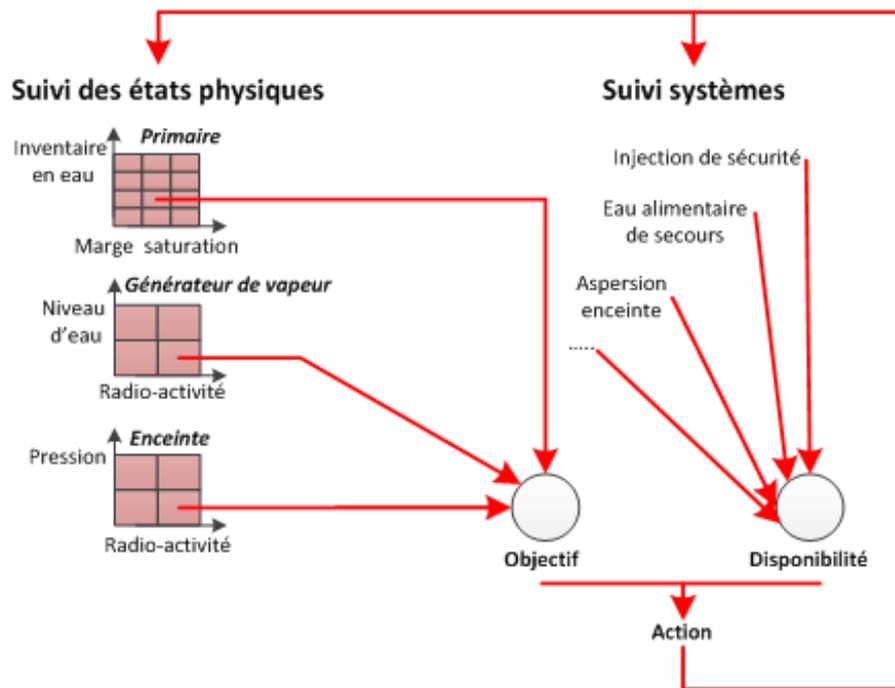


Figure 9 : Principe de l'Approche par Etat (Appell & Chambon, 1998)

Les conditions d'évènements de défaillances multiples peuvent être reproduits à l'infini. En revanche une analyse du comportement systémique du réacteur, engagée suite à l'accident de TMI-2, a permis de démontrer que les états physiques possibles du réacteur sont en nombre limité. Ils peuvent être identifiés à partir d'un nombre limité de données caractérisant l'état physique des principaux composants du réacteur (Tableau 3).

Partie 1 : Contexte opérationnel et d'ingénierie interdisciplinaire du système de conduite CISPI

Conduite	Etats physiques des principaux composants	Fonction de sûreté associée	Grandeurs mesurées
Primaire	Sous criticité et contrôle de la puissance nucléaire	1	Wn = puissance neutronique
	Inventaire en eau du circuit primaire	2	Nc = niveau cuve
	Evacuation de la puissance résiduelle	2	TRIC = température sortie cœur
Secondaire	Inventaire en eau secondaire	2	NGV = niveaux GV
	Intégrité secondaire (GV)	3	Activité GVs
Enceinte	Intégrité de l'enceinte de confinement	3	Pe = pression enceinte DdDe = débit de dose enceinte

Tableau 3 : Etats physiques des principaux composants du réacteur et grandeurs physiques associées (Tarride, 2013)

Un état physique du réacteur est ainsi caractérisé par un regroupement des états des principaux composants relevant des mêmes priorités et donc des mêmes grands types d'action de conduite. Il y'a donc correspondance entre un état type et une stratégie de conduite adaptée. Par exemple, le fonctionnement normal des centrales de type 1300 MWe est décrit par 6 domaines d'exploitations (Figure 10) subdivisés en 14 états standards (Cf. Annexe 1-1) :

- Réacteur Complètement Déchargé (RCD) : (1) Tout combustible dans le bâtiment réacteur,
- Arrêt Pour Rechargement (APR) : (2) Arrêt à froid pour rechargement,
- Arrêt Pour Intervention (API) : (3) Arrêt à froid pour intervention primaire suffisamment ouvert, (4) Arrêt à froid pour intervention primaire entrouvert, (5) Arrêt à froid normal primaire fermé et dépressurisé,
- Arrêt Normal sur RRA (Refroidissement Réacteur à l'Arrêt) (AN/RRA) : (6) Arrêt à froid normal, (7) Arrêt intermédiaire monophasique, (8) Arrêt intermédiaire diphasique aux conditions RRA connecté
- Arrêt Normal sur GV (AN/GV) : (9) Arrêt intermédiaire diphasique aux conditions RRA isolé, (10) Arrêt intermédiaire diphasique sur GV, (11) Arrêt à chaud,
- Réacteur en Production (RP) : (12) Recherche de la criticité, (13) Attente à chaud, (14) Fonctionnement en puissance

L'APE se base sur l'étude de la séquence d'activités mentales permettant à l'humain de prendre une décision dans le contexte de la conduite à partir de son expérience, sa connaissance et de procédures (Rasmussen, 1986). D'un point de vue ergonomique, l'état physique du réacteur correspond à la situation dynamique que l'opérateur de conduite doit comprendre, afin de la maintenir dans des limites acceptables. Pour plus de précisions, nous qualifions cette situation de situation d'états de la centrale. Cette compréhension de la situation d'états garantit à l'opérateur un niveau de sécurité et de performance satisfaisants et repose sur un double axe, d'une part diachronique (compréhension de la situation d'états au cours du temps) et d'autre part, synchronique (prise d'information dans la situation d'états à un instant « t ») (Figure 10).

Partie 1 : Contexte opérationnel et d'ingénierie interdisciplinaire du système de conduite CISPI

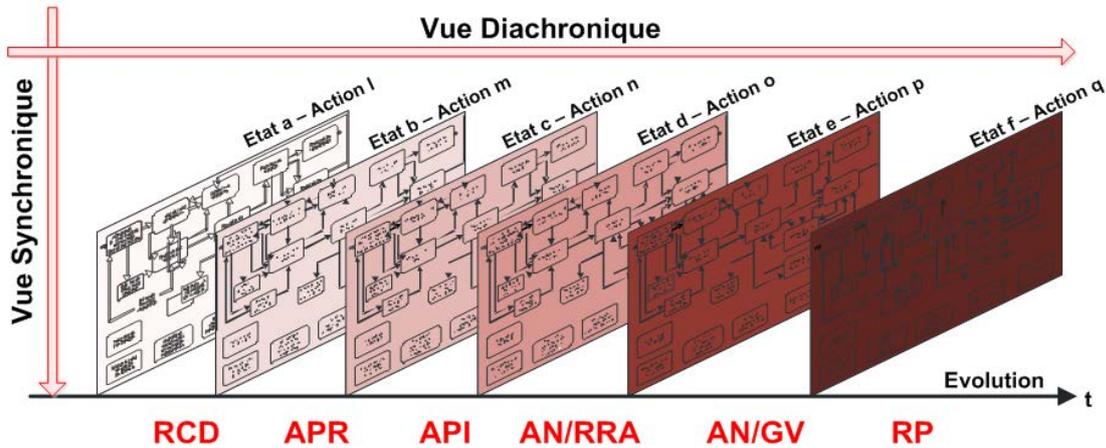
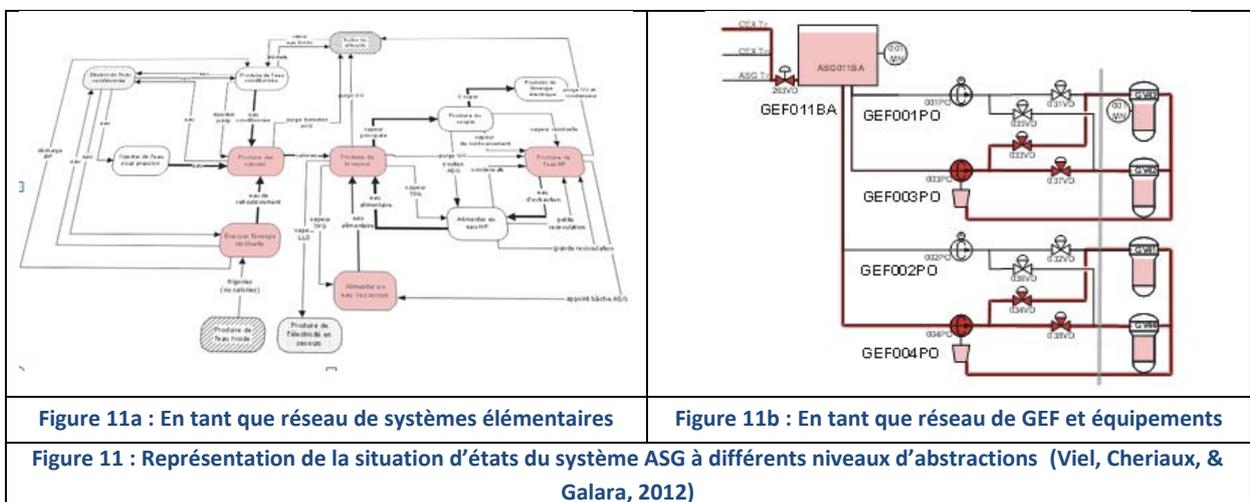


Figure 10 : Conduite du procédé nucléaire vue comme une évolution entre états stables à travers le temps (Galara & Hennebicq, 1999)

Etant donné que l'opérateur ne contrôle que partiellement la situation dynamique, celui-ci doit disposer à tout moment d'une représentation de la situation, représentation qui évoluera ainsi au fil du temps et qui sera à certains moments incomplète du fait des caractéristiques de l'environnement (imprévisibilité, contrôle partiel, multiples variables en interaction) (Neyns, 2011). La représentation de la situation, est une construction mentale élaborée dans un contexte particulier à des fins spécifiques pour faire face aux exigences de la tâche en cours (Richard, 1990). Ainsi cette représentation est finalisée par la tâche et la nature des décisions à prendre. La représentation de la situation d'états occupe une place centrale dans l'activité de conduite par et entre les opérateurs pour faciliter la compréhension individuelle et collective de la situation dynamique en exploitation. Pour maîtriser la complexité de l'installation nucléaire, les opérateurs peuvent distinguer différents niveaux d'abstractions (Viel, Cheriaux, & Galara, 2012) :

- Le niveau « fonctionnement général » correspondant au niveau « Unité de production »
- Le niveau « système élémentaire » correspondant au niveau « fonctions principales d'un système »
- Le niveau « Groupe d'Équipements Fonctionnels (GEF) » correspondant à un regroupement d'équipements de base correspondant en général à un sous-ensemble d'un système élémentaire participant à une « sous-fonction d'un système »
- Le niveau « équipement de base » (vannes, pompes,...)



Partie 1 : Contexte opérationnel et d'ingénierie interdisciplinaire du système de conduite CISPI

A partir de la représentation de la situation d'états et des objectifs de production, les opérateurs de conduite définissent les objectifs de conduite visant à amener ou maintenir l'installation dans un état sûr de fonctionnement (Figure 12).

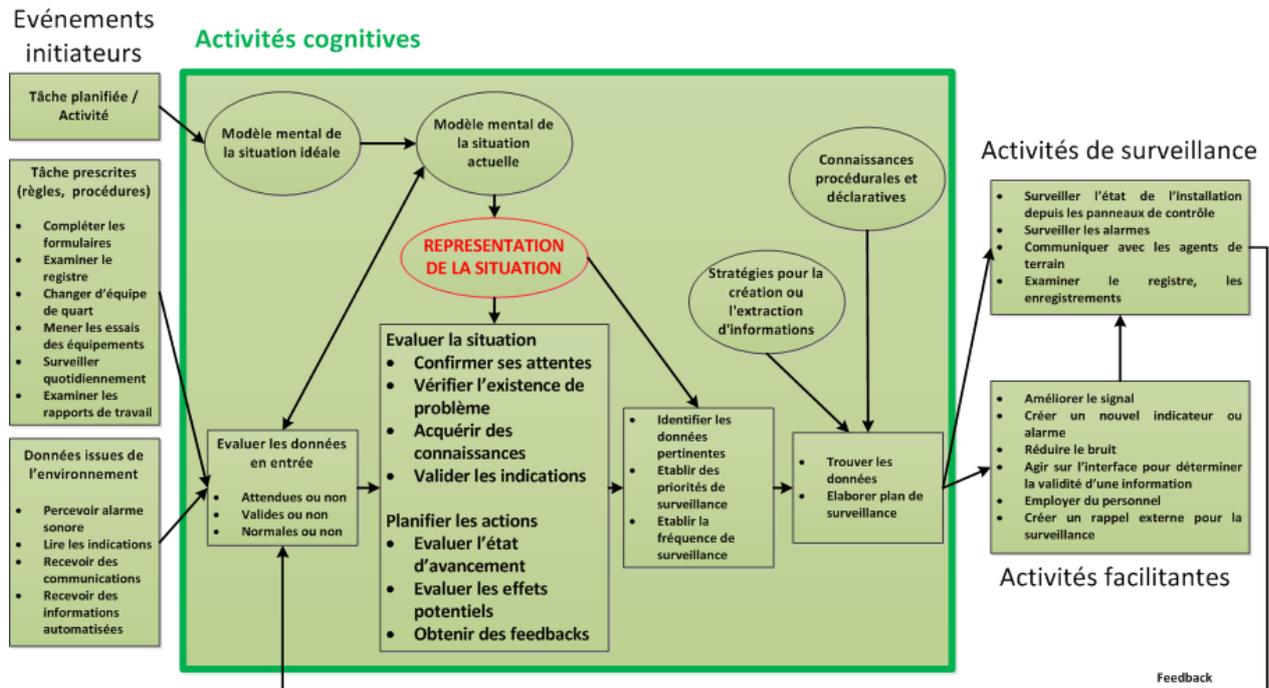


Figure 12 : Modèle de la conduite par un opérateur d'une situation dynamique (procédé nucléaire) (Vicente, Mumaw, & Roth, 2004)

Ainsi, la conduite du procédé nucléaire est perçue comme une évolution d'un état stable initial vers un état stable final, à travers le temps (Figure 10). Cette évolution est réalisée par des actions (Tâches) exécutées séquentiellement par les opérateurs de conduite depuis la salle de commande, mais également en local par les agents de terrain. (Galara, 2011) distingue trois niveaux de conduite : deux niveaux pour la capacité d'agir (stratégie et tactique) et le niveau de l'action sur le système technique :

- Le niveau stratégique est global pour le système technique. Il correspond à un enchaînement en série et/ou en parallèle des objectifs de conduite des fonctions principales, pour atteindre l'objectif de production du système technique, lors de la remise en exploitation et pour le maintenir en production.
- Le niveau tactique est spécifique à chacune des fonctions principales. Il correspond à un enchaînement en série et/ou en parallèle des actions de conduite des fonctions principales, pour atteindre les objectifs des différentes fonctions principales, lors de la remise en exploitation et pour le maintenir en production.
- Le niveau de l'exécution est spécifique à chaque action de conduite. Il correspond à une suite de manœuvres et de contrôles à effectuer, appelé mode opératoire, pour atteindre l'objectif élémentaire de l'action. La formalisation d'un mode opératoire en schéma de manœuvre (Figure 13), consiste à représenter sur le schéma organique d'une fonction principale, les manœuvres à effectuer, ainsi que l'état du circuit concerné par le mode opératoire. Le schéma des manœuvres complète les fiches opérateur et de terrain sur lesquelles sont explicitées les suites de contrôles et de manœuvres effectués depuis la salle de commande et sur le terrain, par l'opérateur et l'agent de terrain, ainsi que

Partie 1 : Contexte opérationnel et d'ingénierie interdisciplinaire du système de conduite CISPI

les messages de coordination entre l'opérateur et l'agent de terrain et les métiers d'exploitation (chimiste, automaticien, ...) nécessaires à l'accomplissement d'un mode opératoire.

Il est ainsi possible de représenter les modes opératoires des différentes situations de conduite : En consignation (pose et dépose de régimes), en arrêt de production (lignage de circuits¹⁴, essais périodiques), en production (mise en service de GEF ou de fonctions principales).

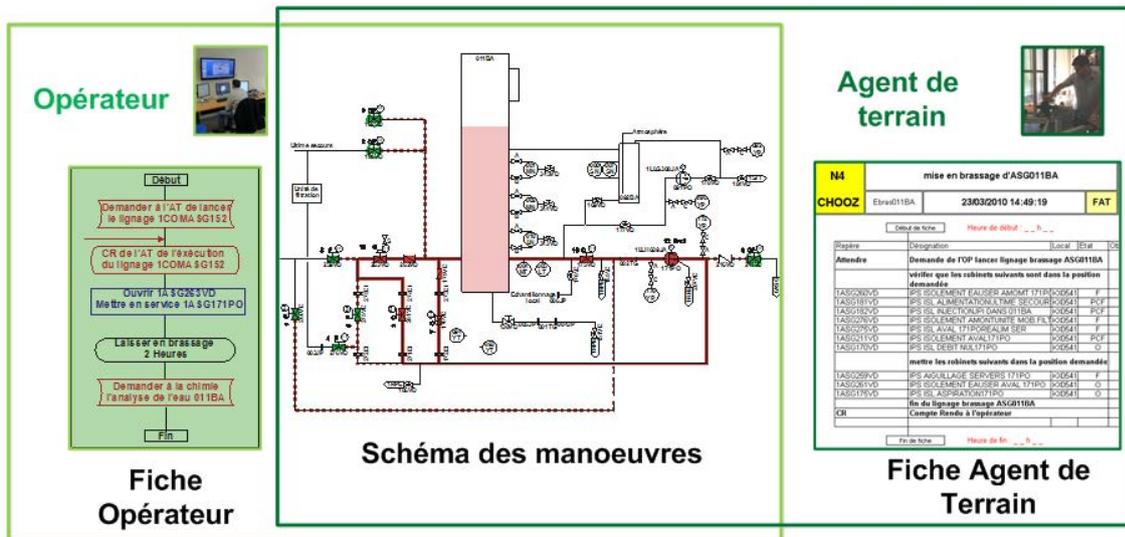


Figure 13 : Schéma d'exécution du mode opératoire de « mise en brassage de la Bâche ASG » (Viel, Cheriaux, & Galara, 2012)

1.3. Caractérisation de l'architecture-système de conduite du procédé industriel critique d'intérêt

Dans ce paragraphe, nous présentons dans un premier temps l'architecture de conduite traditionnellement utilisée selon une approche hiérarchique, pour démontrer les limites de cette organisation en exploitation. Dans un second temps, nous proposons une architecture distribuée pour la conduite, comme celle visée dans le cluster CONNEXION, afin de pallier aux problèmes rencontrés avec une architecture hiérarchique.

1.3.1. Caractérisation de l'architecture existante

La conduite d'un procédé industriel critique (Situation) est répartie entre des agents humains (User) et technologiques (Artefact) (Figure 7) organisés (Organisation) pour exécuter des actions de conduite (Tâche) sur le procédé afin de satisfaire la demande de production dans le strict respect des objectifs de sûreté, environnementale et de sécurité.

¹⁴ Ligner un circuit signifie intervenir sur des ensembles de matériels (vannes, pompes, etc.) pour les configurer c'est à dire régler leurs positions (ouvertes, fermées, etc.) si celles-ci ne sont pas conformes à la position requise (Palaci, 2009)

Partie 1 : Contexte opérationnel et d'ingénierie interdisciplinaire du système de conduite CISPI

A l'heure actuelle, l'Organisation mis en place dans les installations nucléaires repose sur une architecture par niveaux de hiérarchisation (Devic, 2014), aussi bien d'un point de vue technique (Figure 14a), que d'un point de vue humain (Figure 14b). Cette hiérarchisation repose sur le concept CIP (Computer Integrated Process) introduit par (Rao & Wang, 1993) et dédié aux processus de fabrication continu tels que les centrales nucléaires. Le concept CIP se présente comme un concept analogue au CIM (Computer Integrated Manufacturing) (Ranky, 1986) dédié au processus de fabrication discret. Le CIM repose sur un modèle pyramidale comportant une hiérarchie logique organisée en 4 niveaux correspondant à des niveaux de décision. Chaque niveau possède la capacité à formuler les objectifs locaux qui lui sont spécifiques, définir les actions à exécuter en se basant sur l'analyse de la situation courante. Néanmoins, chacun de ces niveaux est borné et contrôlé par les décisions du niveau supérieur en termes d'espace d'application de la décision, d'horizon temporel et d'effets de diffusion (Zarifian, 1990). Ainsi, plus on s'élève dans cette pyramide, plus le niveau de décision est important, plus la visibilité sur la situation dynamique est globale et plus les cycles opérationnels s'allongent.

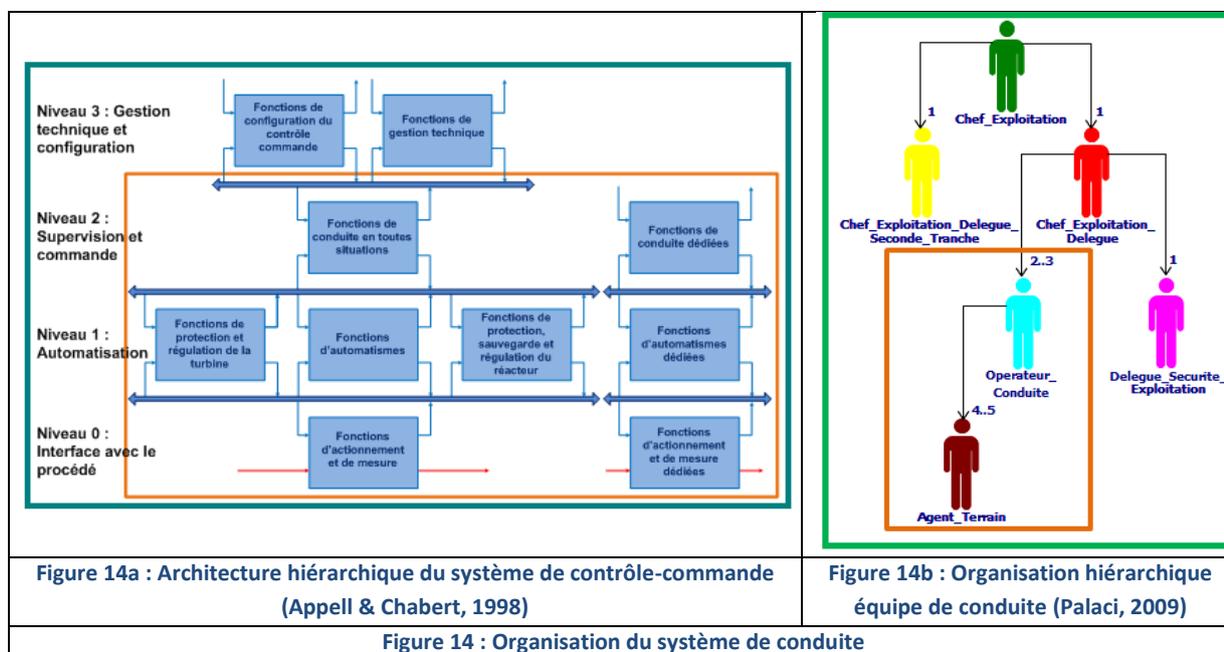


Figure 14 : Organisation du système de conduite

Dans un premier temps nous détaillons la constitution de chacun de ces niveaux de hiérarchisation selon le point de vue technique correspondant au système de contrôle-commande (Artefact) composé d'automates, de capteurs d'actionneurs, d'Interfaces Homme Machine (IHM),... (Figure 14a) :

Niveau 0 : Ce niveau assure l'interface entre le procédé physique à contrôler et le niveau des automatismes. Cette interface est constituée d'une part par l'instrumentation, et d'autre part par les actionneurs pouvant intégrer du traitement. Les informations issues des capteurs peuvent être logiques (fin de courses de vannes, présence de tension sur les tableaux, position ouverte ou fermée de cellule électrique, ...) ou analogique (températures, débits, niveaux, pression, position des grappes de contrôle, intensité,...). Les ordres envoyés aux actionneurs peuvent aussi être analogiques (position d'une vanne réglante, hauteur dans une cuve, débit d'une pompe, ...) ou logiques (demande d'enclenchement ou déclenchement d'une pompe, demande d'ouverture ou fermeture de vannes).

Partie 1 : Contexte opérationnel et d'ingénierie interdisciplinaire du système de conduite CISPI

Niveau 1 : Ce niveau supporte les fonctions d'automatisation du procédé à savoir la mise en et hors service de l'installation, le maintien en régime et les variations de charge, la protection des équipements, de l'installation, du personnel et de l'environnement, la surveillance, les essais et la maintenance de l'installation. On distingue :

- Les fonctions de protection, de surveillance et de régulation liées directement à la sûreté (contrôle de la réactivité, du refroidissement et du confinement) et assurant la protection du réacteur.
- Les fonctions de protection, de surveillance et de régulation du groupe turboalternateur et du poste d'eau. Bien que ces fonctions ne soient pas classées sûreté, certaines d'entre-elles sont importantes pour la disponibilité de l'exploitation.
- Les fonctions d'automatismes des auxiliaires assurant l'automatisation, la surveillance du procédé, la protection des équipements et le maintien de la tranche dans un état stable

Niveau 2 : Ce niveau regroupe les fonctions de conduite, en salle de commande centralisée ou décentralisée permettant à l'opérateur de surveiller l'état et l'évolution du procédé, mais également d'agir sur celui-ci quelle que soit la situation de la tranche. Il comprend l'interface avec les opérateurs de conduite, ou Interface Homme-Machine qui, outre les moyens de commande et d'information (organes de commandes, indicateurs, enregistreurs, écran de visualisation) inclut les fonctions de conduite, de supervision ou d'aide à la conduite. En cas d'indisponibilité des systèmes de conduite principaux, les opérateurs disposent d'un panneau auxiliaire permettant de stabiliser l'installation et d'atteindre un état sûr de fonctionnement, avec des moyens conventionnels plus limités (verrines, indicateurs, relais de point de consigne et relais de commande à main, Tourner-Pousser-Lumineux (TPL), ...). Dans le cas d'une indisponibilité complète de la salle de commande les opérateurs ont la possibilité d'utiliser un panneau de repli comprenant aussi des moyens de conduite limités.

Niveau 3 : Alors que les trois premiers niveaux se rapportent au contrôle-commande propre à une tranche d'une centrale nucléaire, ce niveau correspond aux fonctions communes à plusieurs tranches telles que la gestion technique, la gestion des opérations de maintenance, la surveillance météorologique du site et aux échanges avec des installations externes au site tels les dispatchings ou les centres nationaux de crise. Au-delà de ces fonctions centrales du contrôle-commande, il existe également des fonctions de contrôle-commande dites décentralisées qui concerne soit :

- Des fonctions autonomes sans liens avec les fonctions centralisées (la détection d'incendie, le contrôle des accès,...)
- Des fonctions pour lesquelles il n'a pas été jugé nécessaire de ramener leur supervision en salle de commande (production d'eau déminéralisée, traitements d'effluents,...)
- Des fonctions qui ne sont nécessaires qu'occasionnellement (auscultation de l'enceinte, ...)

Dans un second temps, nous détaillons l'organisation hiérarchique de l'équipe de conduite structurée selon quatre niveaux fonctionnels et composée : d'un Chef d'Exploitation (CE), d'un Chef d'Exploitation Délégué (CED), de deux Opérateurs de conduite(OP), d'un Délégué Sécurité en Exploitation (DSE) et de quatre ou cinq Agents de Terrain (AgT) (Figure 14b). Notre étude se focalise plus précisément sur les opérateurs de conduite et les agents de terrains constituant les utilisateurs (User) de notre situation d'intérêt.

1 Chef d'Exploitation (CE) : supervise deux tranches, donc deux équipes de conduites au sein desquelles il assure un rôle managérial en tant que responsable hiérarchique. Il pilote les activités d'exploitation en situation normale, incidentelle ou accidentelle et en arrêt de tranche. Il contribue ainsi à la maîtrise du niveau de sûreté, à la meilleure disponibilité des tranches, à la maîtrise des coûts d'exploitation et à la performance de

Partie 1 : Contexte opérationnel et d'ingénierie interdisciplinaire du système de conduite CISPI

la conduite des installations. En parallèle, il occupe un rôle technique en supervisant les acteurs de la conduite, mais aussi un rôle de contrôle et surveillance de l'activité de conduite.

1 Chef d'Exploitation Délégué (CED) : seconde le Chef d'Exploitation de son équipe, contribuant à l'organisation du planning des activités du quart, à l'encadrement et au soutien technique de l'équipe de conduite. En ce sens, le CED assure la coordination des métiers de la maintenance et de la conduite. Il joue également un rôle dans la planification et le management des compétences des agents en élaborant les plans internes de formations des agents.

1 Délégué Sécurité en Exploitation (DSE) : est responsable de la sécurité des interventions sur le matériel. Il travaille dans le bureau des consignations, assurant la mise hors(ou en) service des équipements au préalable (ou suite) à la réalisation de travaux de maintenance de tranche en fonctionnement ou en arrêt. Il apporte une expertise « exploitation » aux différents métiers de la conduite.

2 ou 3 Opérateurs de conduite (OP) : surveillent et conduisent l'installation depuis la salle de commande. Chaque opérateur est responsable d'une partie de l'installation. Ainsi, l'opérateur réacteur (OPR) s'occupe du circuit primaire (du réacteur au générateur de vapeur) et l'opérateur eau-vapeur (OPEV) se charge du secondaire (du générateur de vapeur au groupe turbo-alternateur). L'activité des opérateurs de conduite se caractérise par plusieurs types de tâches (la conduite, la surveillance, l'encadrement des AgT, la coordination des différents intervenants et les essais périodiques) avec pour objectif de satisfaire au plus près les exigences de performance et de sûreté.

- Au cours de la conduite, les OP assurent l'adaptation du point de fonctionnement de l'installation aux besoins du réseau. Ils optimisent au maximum la production de leur tranche tout en restant dans le domaine de fonctionnement de l'installation.
- En parallèle, les OP effectuent la surveillance de l'installation, par le biais d'équipements et d'afficheurs de différentes natures (digitaux, papier, lumineux, informatique), en suivant l'évolution d'un certain nombre de paramètres. Ils doivent ainsi détecter, acquitter les alarmes et appliquer les mesures correctives adéquates si besoin.
- L'encadrement des agents de terrain : Certains paramètres ne pouvant être contrôlés depuis la salle de commande, les opérateurs font appel aux AgT afin d'intervenir directement sur un élément de l'installation. En ce sens, les OP coordonnent l'activité des AgT et contrôlent leurs comptes rendus.
- Les OP sont également en charge de la coordination des différents intervenants (internes ou extérieurs). En ce sens, ils contrôlent la compatibilité des besoins et des interventions de chacun avec les contraintes du planning du quart et anticipent tout phénomène induit sur le système.
- Finalement les OP exécutent quotidiennement des essais périodiques planifiés destinés à contrôler l'état de l'installation

4 ou 5 agents de terrain (AgT) : ils réalisent certaines manœuvres non réalisables depuis la salle de commande en intervenant physiquement sur les organes et équipements de l'installation. Leur travail se décompose en trois tâches principales : les rondes, les manœuvres d'exploitation et les essais périodiques :

- Les rondes sont de deux types : rondes d'observation et rondes de relevés. Au cours des rondes d'observations, l'AgT est affecté à une zone géographique de la tranche (salle des machines, bâtiment réacteur, etc.) dans laquelle il doit se déplacer et observer le matériel ainsi que la propreté de son environnement. Il fait alors appel à l'ensemble de ces sens (vue, ouïe, odorat, toucher) pour percevoir les écarts, les noter et les signaler aux OP ou CED en y associant une première analyse.

Partie 1 : Contexte opérationnel et d'ingénierie interdisciplinaire du système de conduite CISPI

Durant les rondes de relevés, l'AgT doit collecter des informations (valeurs de paramètres, ou configuration) spécifiées qui ne sont pas relayés en salle de commande par les automatismes.

- Au cours des manœuvres d'exploitation les AgT manipulent le matériel de l'installation à la demande des OP. Il peut s'agir d'opérations de lignages, de modifications de configuration de circuits, de mise en ou hors services de matériels, ... La plupart de ces manœuvres doivent être réalisées en suivant une procédure (gamme de lignage, fiche de manœuvre) indiquant la séquence des manipulations à effectuer.
- Les AgT effectuent également des essais périodiques au cours de leur ronde sur demande du CED ayant fourni au préalable la procédure correspondante.

Les retours d'expériences, ainsi que les tendances internationales montrent que ce type d'architecture hiérarchique a pour effet de filtrer les informations de conduite au niveau de la salle de commande, sans prendre en compte de manière intégrée les besoins des opérateurs en local (AgT) durant les interventions de surveillance, de conduite, de maintenance et d'entretiens d'arrêt de tranche (consignation, lignage, essais de remise en service). Chaque métier d'exploitation a une vision tronquée du procédé à conduire. Ainsi, pour accéder aux informations disponibles sur les interfaces du système de contrôle-commande, les autres métiers perturbent la sérénité de la salle de commande. L'accès à des informations complémentaires s'effectue par voie orale pouvant être sources d'ambiguïtés et entraîner le risque d'interprétations erronées.

1.3.2. Caractérisation de l'architecture visée

Il devient nécessaire d'aider d'avantage les équipes de conduite à actualiser facilement et rapidement leurs représentations de l'état de l'installation et de la conduite pour leur permettre d'anticiper les évolutions de paramètres et les actions à venir, et fournir ainsi une vision globale de l'installation en tout lieu et à tout instant. Cela nous amène à nous questionner sur une évolution des architectures hiérarchiques des systèmes de conduites des centrales nucléaires, vers une architecture distribuée (Figure 15) afin d'améliorer la disponibilité des informations (Neunreuther, 1998). Le terme distribué est utilisé pour désigner le fait que l'application ne soit pas centralisée. En ce sens, l'architecture résultant de la distribution des fonctions de conduite autour d'un bus d'exploitation, constitue une hétéarchie (Waldner & Duffin, 1992) dans laquelle la coopération de ces fonctions dépend de leur interopérabilité. Cette évolution n'est rendu envisageable qu'aujourd'hui de par l'évolution et la pénétration des systèmes numériques de contrôle commande dans le domaine du nucléaire.

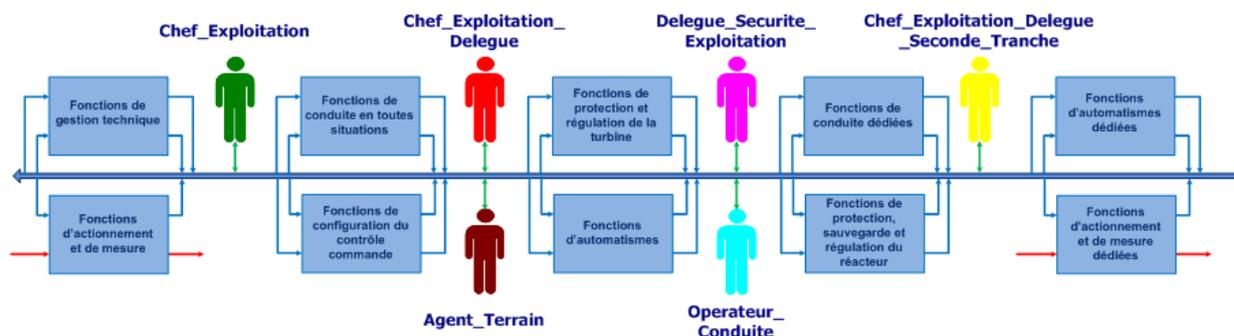
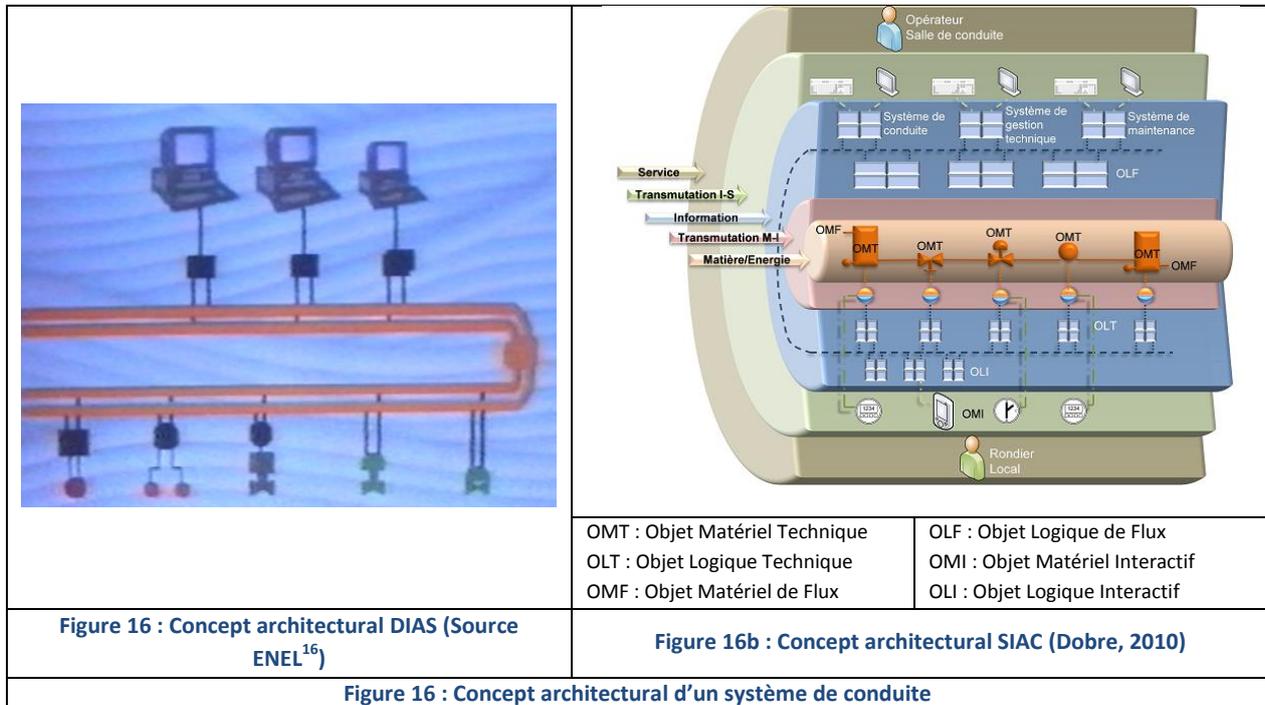


Figure 15 : Distribution des fonctions et des opérateurs de conduite autour d'un bus d'objet métier

Partie 1 : Contexte opérationnel et d'ingénierie interdisciplinaire du système de conduite CISPI

Divers travaux antérieurs du laboratoire, en collaboration avec la DER (Direction des Etudes et Recherches) d'EDF ont œuvré en ce sens dans le cadre d'importants programmes européens de R&D dans le domaine de l'énergie : **ESPRIT II-DIAS** (Distributed Intelligent Actuation and Sensors), **REMAFEX** (Remote Maintenance for Facility Exploitation) **ESPRIT III PRIAM** (Prenormative Requirements for Intelligent Actuation and Measurement), **ESPRIT III EIAMUG** (European Intelligent Actuation and Measurement User Group) et **ESPRIT IV IAM-PILOT** (Intelligent Actuation and Measurement Pilot). Ces derniers ont montré l'intérêt d'architectures techniques interopérables, distribuant au plus près du procédé une forme d'« intelligence technique » afin d'intégrer, en un système de conduite, de maintenance et de gestion technique (CMMS)¹⁵, des systèmes d'actionnement et de mesure intelligents (IAMS) autour d'un bus de terrain (Figure 16a) (Iung, 1992), (Pétin, 1995), (Neunreuther, 1998), (Leger, 1999) et (Liu, 2002). Ces travaux ont récemment été revisités par (Dobre, 2010) pour proposer un Système Interactif d'Aide à la Conduite (SIAC) permettant aux agents de terrain d'interopérer en tout lieu, à tout instant et pour toute action de conduite avec le processus physique, via des objets interactifs « logiques » (*fournissant un ensemble de services aux métiers d'exploitation*) et « matériels » (*fournissant l'interface homme-machine*) (Figure 16b).



Le concept architectural du SIAC encapsule le canal physique de flux de matière/énergie (*World of Physics*) par un bus d'informations numérique articulant un ensemble d'objets logiques (*World of Logic*) exécutant des traitements de données, afin de refléter dynamiquement et au mieux le comportement du procédé. Ainsi d'un point de vue global, l'objectif du SIAC est de développer l'interactivité numérique entre l'ensemble des constituants humains et techniques.

¹⁵ Paradigme CMMS-IAMS (Integrated Control Maintenance and technical Management System – Intelligent Actuation and Measurement System) (AFIS - GT Ingénierie Système, 2005)

¹⁶ <https://www.enel.it/it-it>

Partie 1 : Contexte opérationnel et d'ingénierie interdisciplinaire du système de conduite CISPI

D'un point de vue plus détaillé, les objets logiques constituant le SIAC sont de deux types :

- **Techniques et physiques** : pour assurer la transmutation entre le canal physique et celui de l'information. Parmi ces objets, on trouve les Objets Logiques Techniques (OLT), qui reflètent le comportement des Objets Matériels Techniques (OMT) et assurent le filtrage des actions du rondier par rapport à la situation d'état du processus à consigner (Figure 17). C'est à ce niveau que l'on retrouve les constituants d'actionnement et de mesure pouvant éventuellement embarquer une forme d'intelligence technique. On trouve également, les Objets Logiques de Flux (OLF) représentant le comportement des Objets Matériels de Flux (OMF) et assurant le filtrage des actions du rondier par rapport à l'état du procédé, mais en se limitant cependant aux modes opératoires (MO). En ce sens, les OLF permettent la gestion des exclusions entre les MO, la transmission de la liste des actions au rondier, ainsi que l'affichage des actions à exécuter par l'opérateur.

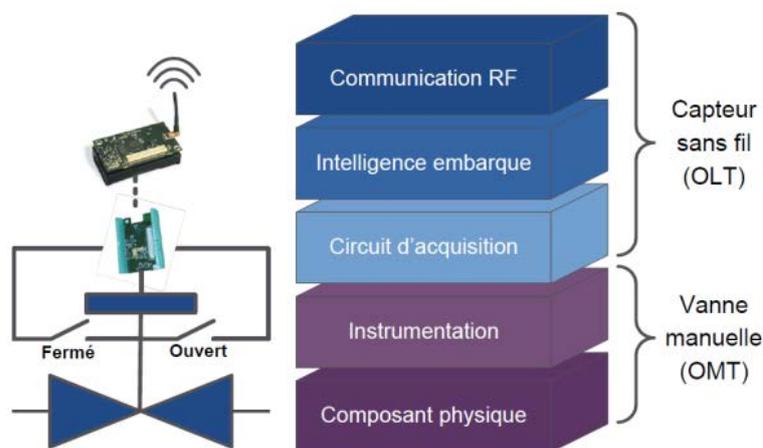


Figure 17 : Afin de pouvoir augmenter les capacités des vannes manuelle (OMT) un certain nombre de fonctions et de traitements (OLT) sont nécessaires, allant de la connexion physique des signaux de la vanne jusqu'à la communication (sans fil) des informations associées (Dobre, 2010)

- **Interactifs** : pour assurer la transmutation¹⁷ entre le canal d'information et celui des services. Parmi ces objets, on trouve les Objets Logique Interactif (OLI) qui fournissent au rondier des services d'assistance au cours de ces activités, et des Objet Matériel Interactif (OMI) fournissant l'interface Homme-Système.

Les différents objets logiques composant le SIAC, avec leur comportement propre, interagissent entre eux dans un but commun à travers un système multi-agents implémenté à l'aide de la bibliothèque multi-agents JADE (Java Agent DEvelopment framework). Ainsi, l'architecture multi-agent du SIAC définit trois types d'agents (Figure 18) :

- Un agent guide d'exploitation (**GE**) permettant à l'opérateur (**Op**) de démarrer des modes opératoires (**MO**)
- Des agents **MO** reprenant chacun la connaissance relative à un mode opératoire et correspondant à un OLF
- Des agents **assistant** facilitant l'échange des messages entre les agents MO et le rondier

¹⁷La transmutation assure la transformation de nature

Partie 1 : Contexte opérationnel et d'ingénierie interdisciplinaire du système de conduite CISPI

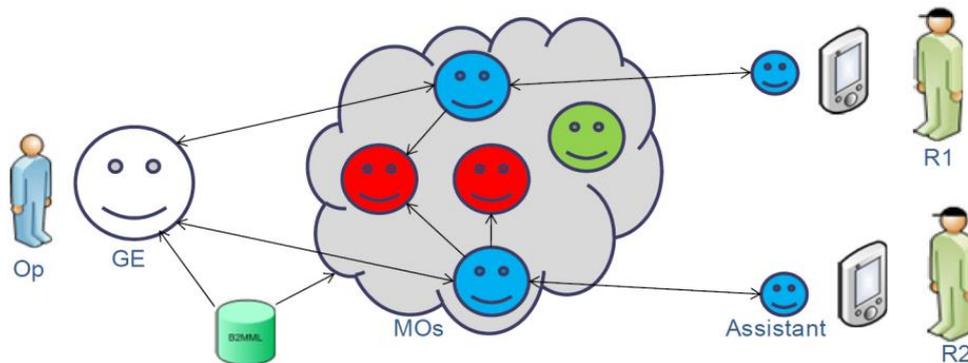


Figure 18 : Architecture multi-agents du SIAC (vert = agent disponible, bleu = agent en exécution, rouge = agent en exclusion) (Dobre, 2010)

1.4. Conclusion : Plate-forme CISPI constitutive de la situation système de conduite ciblée

L'objectif de ce chapitre était de présenter le contexte opérationnel d'un système de conduite interactive d'un procédé industriel critique. En ce sens, nous nous sommes intéressés à la situation système de conduite ainsi qu'à l'architecture distribuée visée pour ce type de système dont le but est d'assurer un continuum d'informations entre agents techniques et agents humains en situation opérationnelle de conduite aussi bien que d'ingénierie, dans une perspective globale de management du cycle de vie des données techniques de l'installation.

Afin de prendre en compte tous les phénomènes critiques émergents de ce type de situation, il nous a fallu retenir un cas d'étude qui reflétait au mieux cette réalité. En ce sens, notre choix s'est orienté vers la plate-forme CISPI (Conduite Interactive et Sûre de Procédé Industriel) du CRAN, simulant (à une grandeur d'échelle moindre) la fonction élémentaire d'alimentation de secours des générateurs de vapeur (ASG) et implémentant l'architecture visée à travers le déploiement d'un SIAC sur cette plate-forme. Cette plate-forme, issue du projet SAFETECH (Clanché, Gouyon, Dobre, Pétin, & Morel, 2010), se veut la plus proche de la réalité, en reconstituant des situations concrètes de travail en centrale, à travers des modes opératoires variées (*en production, en arrêt, en démarrage, etc.*) adaptés à la criticité des modes d'exploitation rencontrés (*conduite normale, conduite incidentelle et accidentelle*) et selon des constantes de temps différentes (*conduite en temps réelle, maintenance hors ligne*). Elle est constituée d'une partie processus physique (Figure 19) représentant le système en local, et d'une partie salle de commande (Figure 20) permettant d'interagir avec des équipements du procédé et d'en effectuer la supervision.

Partie 1 : Contexte opérationnel et d'ingénierie interdisciplinaire du système de conduite CISPI



Figure 19 : Processus physique de la plate-forme CISPI à conduire (hydraulique) – Emulation du procédé ASG (Alimentation Secours des Générateurs de Vapeur)



Figure 20 : Salle de commande de la plate-forme CISPI du CRAN

Partie 1 : Contexte opérationnel et d'ingénierie interdisciplinaire du système de conduite CISPI

Une caractéristique essentielle de cette situation système de conduite concerne l'eau circulante (« flowing object ») donnant la vie au système à travers deux types d'interactions (Hall & Rapanotti, 2005):

- Causale : c'est-à-dire réagissant à des événements de façon prévisible et déterministe. Cela est notamment le cas avec les agents techniques de conduite
- Docile : c'est-à-dire pouvant réagir à des événements, mais de façon pas toujours prévisible ni déterministe. Cela est notamment le cas avec les agents humains de conduite

En ce sens, nous nous intéressons dans le second chapitre aux différents domaines d'ingénieries centrées technique et humain requis pour la conception de ce type de système « Machine-Homme ». Dans un second temps, nous montrons leurs limites dans la prise en compte global des phénomènes interdisciplinaires émergents, ce qui nous amène à prôner une ingénierie centrée système.

Partie 1 : Contexte opérationnel et d'ingénierie interdisciplinaire du système de conduite CISPI

2. Chapitre 2 : Contexte d'ingénierie interdisciplinaire du système pour faire CISPI

2.1. Introduction : Caractérisation de la situation-système d'ingénierie CISPI

La conduite d'un système critique reste majoritairement sous un contrôle humain (Devic & Morilhat, 2013). En effet, de par sa nature résiliente l'humain est capable de s'adapter à des situations inattendues, ce qui s'avère être primordial dans une organisation orientée sûreté (Hollnagel & Woods, 2005). Cependant l'étude de ces systèmes fait également apparaître que l'humain ne peut les assumer toutes notamment celles répétitives, fastidieuses ou dans des environnements hostiles.

"Human reliability needs to be taken carefully from two points of view: (1) Human have limitations (2) Human are unique problem-solvers in unanticipated situations" (G. Boy, 2011).

En ce sens, les systèmes de conduite d'un procédé industriel (**Process Part**) sont vus comme des systèmes socio-techniques où les opérations de conduite sont réalisées par l'interaction de deux constituants de natures différentes : humaine (**Human Part**) et technique (**Technical Part**) (Figure 21).

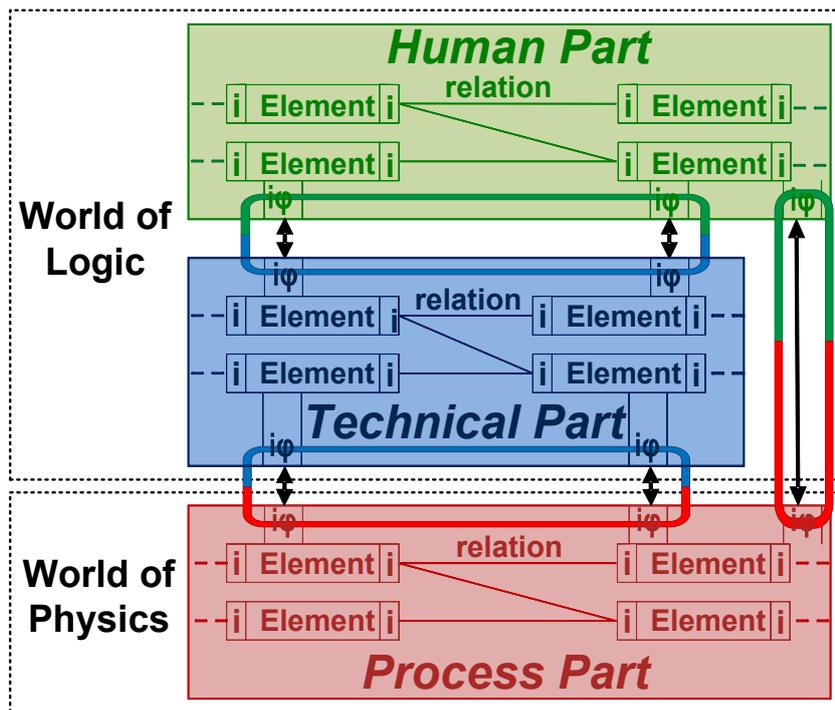


Figure 21 : Système de conduite d'un procédé en exploitation, adaptée de (Galara & Hennebicq, 1999)

Un constat récent a mis en évidence qu'il n'existe pas véritablement d'ingénierie centrée système à même de construire un modèle (M_H) partiel de la totalité d'une situation réelle, mais qu'il existe en revanche des ingénieries (*centrée technique ou centrée humaine*) contribuant à la construction d'un ensemble de modèles constitutifs de parties (M_p) permettant la définition d'un modèle (M_h) total d'une faisabilité de la situation.

Despite the holistic approach of systems engineering (SE), systems still fail, and sometimes spectacularly.... Human-Centred Design (HCD) provides the creativity factor that SE lacks. It promotes

Partie 1 : Contexte opérationnel et d'ingénierie interdisciplinaire du système de conduite CISPI

modelling and simulation from the early stages of development and throughout the life cycle of a product. Unifying HCD and SE will shape appropriate Human System Integration (HSI) and produce successful systems (G. A. Boy & Narkevicius, 2014)

Ainsi, nous explorons dans ce chapitre les apports potentiels des approches d'ingénieries centrées technique et humain, pour conclure sur les approches d'ingénieries centrées systèmes, les seules à même de pallier à la dichotomie courante entre ces ingénieries disciplinaires.

2.2. Caractérisation d'une ingénierie de conduite centrée technique

Comme le souligne (Devic & Morilhat, 2013), pour faire face à la complexité croissante des systèmes de conduite, il convient d'adopter une approche d'ingénierie système où l'on considère le système dans sa globalité selon différents points de vues interdisciplinaires.

2.2.1. Ingénierie système guidée par les processus

L'Ingénierie Système est une démarche méthodologique coopérative et interdisciplinaire qui englobe l'ensemble des activités adéquates pour concevoir, développer, faire évoluer et vérifier un ensemble de produits, processus et compétences humaines apportant une solution économique et performante aux besoins des parties prenantes et acceptable par tous. Cet ensemble est intégré en un système, dans un contexte de recherche d'équilibre et d'optimisation sur tout son cycle de vie (Fiorèse & Meinadier, 2012).

La démarche d'ingénierie système s'appuie sur la définition et l'utilisation de processus formalisés dans différentes normes (IEEE 1220, 2005), (ANSI-EIA-632, 1999), (ISO/IEC 15288, 2008) par les associations d'ingénierie système INCOSE (International Council of Systems Engineering) et AFIS (Association Française d'Ingénierie Système) en collaboration avec de grands organismes de normalisation comme l'AFNOR, l'ANSI ou l'IEEE. Ces normes décrivent les activités à réaliser ainsi que les résultats à produire pour gérer un système¹⁸ de son concept initial à sa mise à disposition en passant par son développement et sa réalisation. Ces trois normes sont complémentaires, en effet, elles recouvrent des champs différents avec des niveaux d'approfondissements différents.

La comparaison (Figure 22) proposée par l'AFIS nous permet d'évaluer :

- Le domaine de couvertures de ces normes (*axe horizontal des ellipses*) en termes de processus (techniques, management, contractuels, d'entreprises) mais également en terme de phase du cycle de vie de système
- Leurs niveaux de détail dans la description des activités du processus (*axe vertical des ellipses*)

¹⁸ Un système est caractérisé par un ensemble de constituants (matériels technologiques, logiciels, opérateurs humains, matériaux, procédures, services) ; les constituants sont en forte interaction, et échangent des flux de matière, d'énergie et d'information dans un environnement ou contexte donné. Cet ensemble satisfait des besoins, des attentes ; il accomplit une mission assortie d'objectifs prescrits permettant de répondre à une finalité (Faisandier, 2014).

Partie 1 : Contexte opérationnel et d'ingénierie interdisciplinaire du système de conduite CISPI

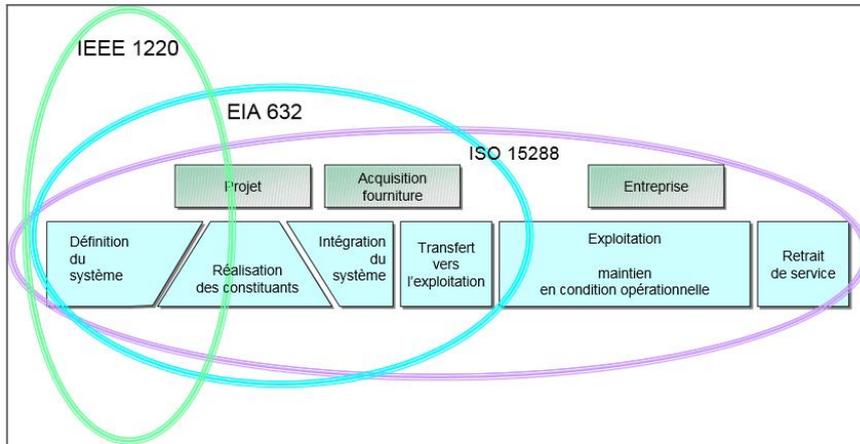


Figure 22 : Domaines couverts par les trois normes générales de l'ingénierie système (Fiorèse & Meinadier, 2012)

Le choix de guider l'ingénierie système à travers des processus s'explique par le fait que les activités à mener pour maîtriser la conception des systèmes restent invariantes quel que soit les projets et domaines d'application. Il est donc plus naturel de définir des processus plutôt que des cycles de vie¹⁹ comme cela était fait précédemment : cycle en cascade (Royce, 1970), cycle en spirale (Boehm, 1988), cycle en V (Forsberg & Mooz, 1995). Ainsi, les processus constituent une vision opératoire de l'ingénierie système, complémentaire à la vision séquentielle des activités de management du projet quel que soit le cycle de vie retenu (AFIS - GT Ingénierie Système, 2005).

Ces normes classent les processus en quatre catégories (Figure 23) :

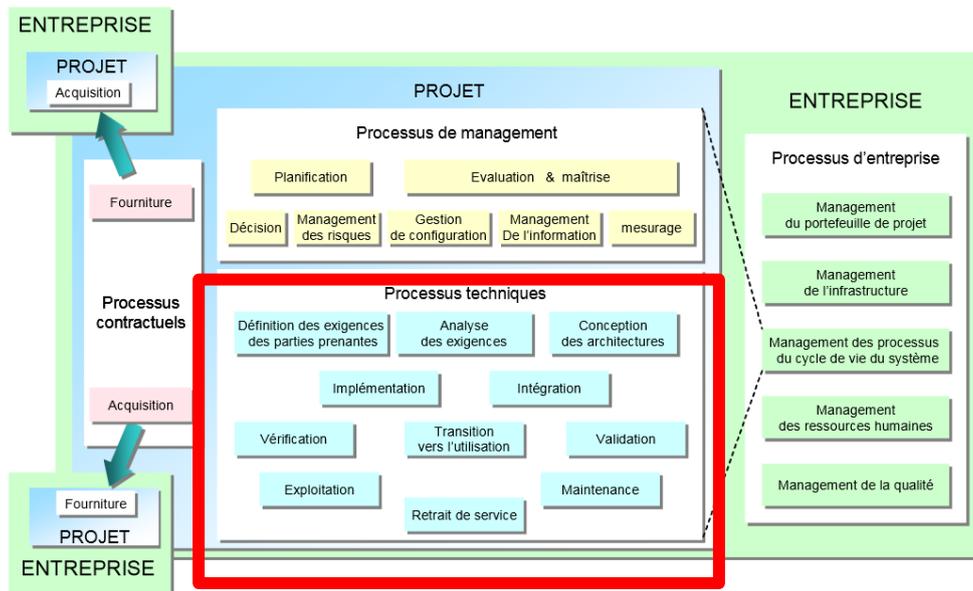


Figure 23 : Cartographie des processus du cycle de vie du système (ISO 15288) (Fiorèse & Meinadier, 2012)

¹⁹ Le cycle de vie d'un système est l'ensemble organisé des activités afférentes à ce système tout au long de sa vie. La vie du système comporte différents états et les décisions de transition entre ces états. Un état (ou une situation de vie) du système est défini par une finalité, des activités, les résultats de l'exécution de ces activités (Faisandier, 2014).

Partie 1 : Contexte opérationnel et d'ingénierie interdisciplinaire du système de conduite CISPI

- Les processus techniques qui participent à la transformation des besoins en solution et à la vie opérationnelle des produits correspondants
- Les processus de management (ou processus de projet) qui participent à la maîtrise des processus techniques dans le contexte du ou des projets (particulièrement de l'IS dans les projets)
- Les processus contractuels qui assurent les relations acquéreur-fournisseur (par exemple avec le client et les sous-traitants pour un projet dans une entreprise)
- Les processus d'entreprise qui ont pour rôle de développer le potentiel en IS de l'entreprise en manageant les domaines communs aux différents projets d'IS.

Trois ouvrages de référence (NASA, 2007), (INCOSE, 2010) et (Fiorèse & Meinadier, 2012) viennent compléter ces normes, constituant un référentiel d'ingénierie système reconnu par l'AFIS pour travailler aussi bien en approfondissement que pour servir d'aide à l'organisation de la connaissance (Le Put & Meinadier, 2009). Notons également que le corpus de connaissances en ingénierie système a récemment fait l'objet d'un consensus international dans le cadre du projet BKCASE (Body of Knowledge and Curriculum to Advance Systems Engineering) sous la forme d'un guide : SEBoK²⁰ (Systems Engineering Body of Knowledge) (Pyster, et al., 2012). La collection « Ingénierie et architecture des systèmes pluridisciplinaires » de Faisandier ainsi que les travaux du Centre d'Excellence sur l'Architecture, le Management et l'Economie des Systèmes (CESAMES²¹) confortent ce référentiel des bonnes pratiques en ingénierie système.

Dans la suite de ce mémoire, nos travaux se focalisent sur les processus techniques d'ingénierie système. Ces derniers s'exécutent de façon concourante par itérations successives et de façon récursive (Figure 25) à chaque niveau de décomposition du système étudié en sous-systèmes (Figure 24) à travers la notion de bloc-système²² (« building block ») (ANSI-EIA-632, 1999). Quel que soit le niveau de cette décomposition arborescente, un ou plusieurs constituants terminaux implémentant une ou plusieurs technologies peuvent être définis. En ce sens, le travail de l'ingénieur système se termine par la définition (**Définition des Concepts**) et la description d'exigences pour chacun des constituants du système étudié. Chaque métier relatif à une technologie (*mécanique, électrique, hydraulique, logiciel, automatique,...*) collecte alors ces exigences et les consolide vis-à-vis de sa connaissance pour prescrire des exigences techniques (**Définition du système**) satisfaisant les exigences parties-prenantes du bloc système de niveau supérieur. Ces relations de description-prescription, ou en d'autres termes, ces « feedbacks » sont appliqués de manière récursive à chaque niveau de décomposition du système impliquant les mêmes processus génériques d'ingénierie système (*Définition des exigences parties prenantes, analyse des exigences, conception des architectures, vérification, validation, ...*) et requérant des capacités d'interactions interdisciplinaires entre l'ingénieur système et l'ensemble des ingénieries métiers. (Dobre, 2010) définit cette relation de description-prescription comme un processus de spécification, se situant au centre du processus global d'ingénierie système et que nous étudions plus en détail dans le prochain chapitre de ce mémoire.

²⁰ [http://sebokwiki.org/wiki/Guide_to_the_Systems_Engineering_Body_of_Knowledge_\(SEBoK\)](http://sebokwiki.org/wiki/Guide_to_the_Systems_Engineering_Body_of_Knowledge_(SEBoK))

²¹ <http://www.cesames.net/cesames>

²² Bloc-système : Selon l' (ANSI-EIA-632, 1999) un système se présente sous la forme d'un arbre constitué d'un certain nombre de blocs systèmes. Cette structure de bloc décrit un système comme étant constitués de produits de deux sortes : les produits opérationnels (ou finals) qui réalisent les fonctions opérationnelles du système et les produits support assurant les fonctions de support du système (Micouin, 2011).

Partie 1 : Contexte opérationnel et d'ingénierie interdisciplinaire du système de conduite CISPI

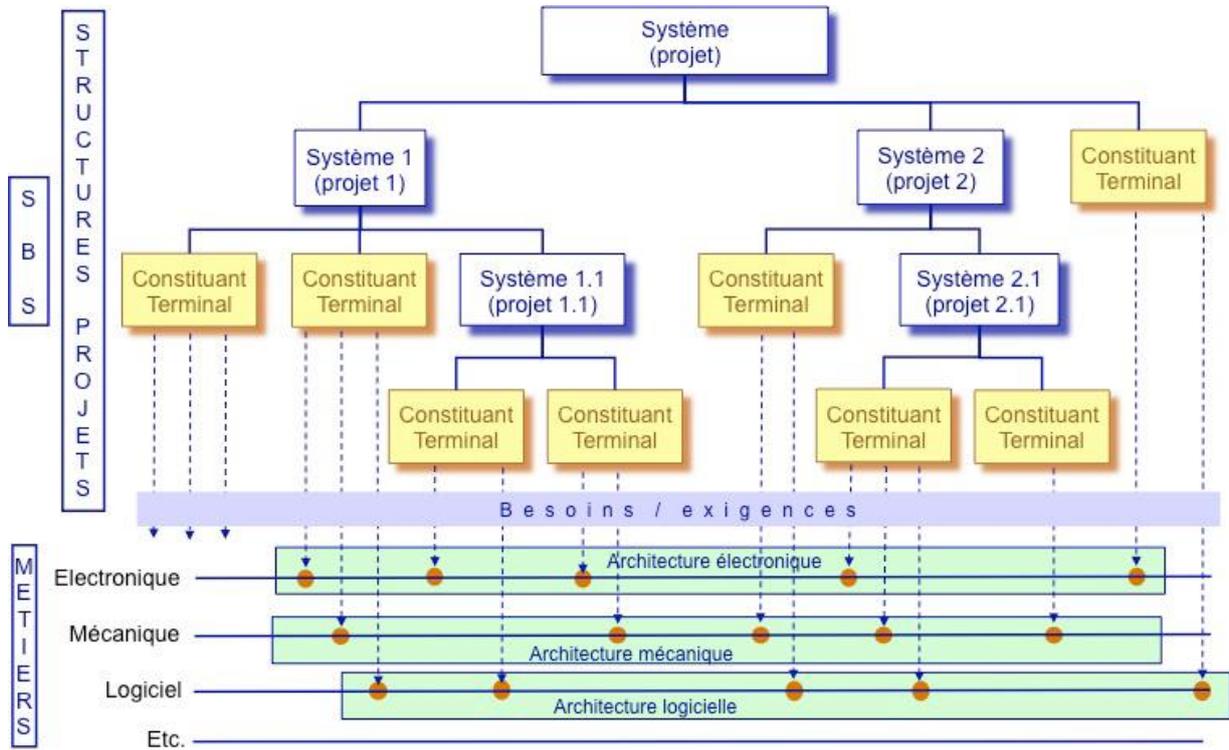


Figure 24 : Relations entre l'ingénierie du système et l'ingénierie des technologies (Faisandier, 2014)

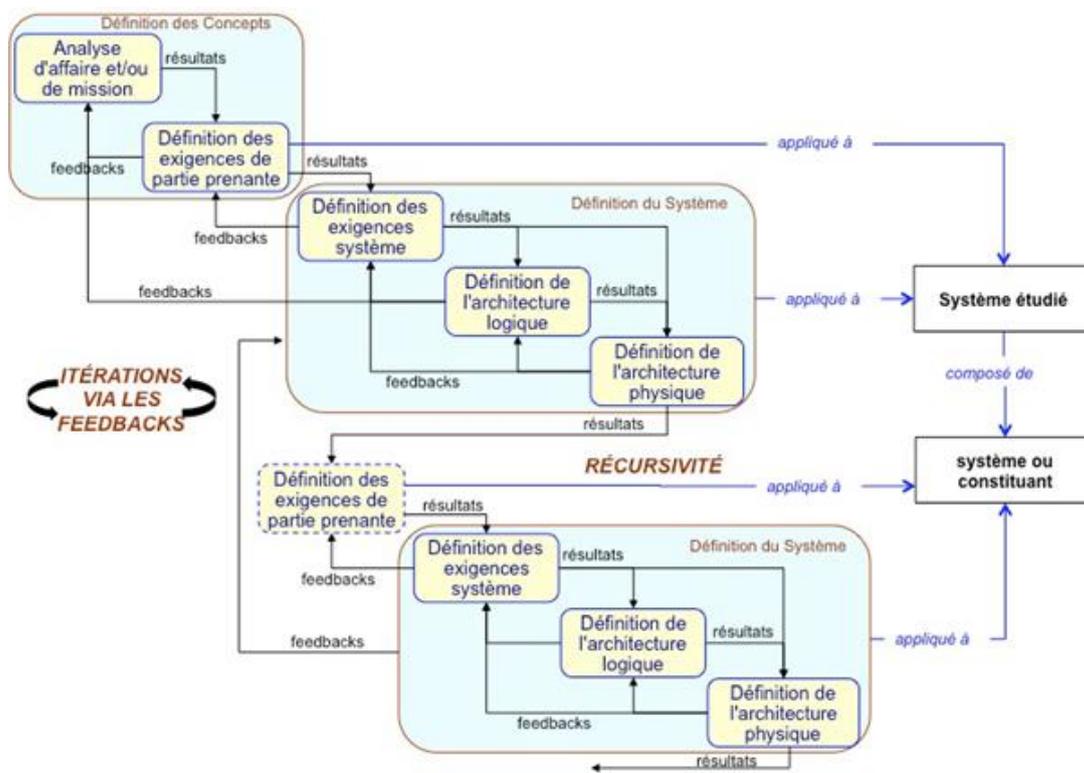


Figure 25 : Itération et récursivité des processus de définition (Faisandier, 2014)

Partie 1 : Contexte opérationnel et d'ingénierie interdisciplinaire du système de conduite CISPI

2.2.2. Ingénierie système basée sur des modèles

2.2.2.1. Ingénierie système basée sur les documents versus Ingénierie système basée sur les modèles

Pour faire face à la complexité croissante des systèmes, l'INCOSE (2007) attire l'attention sur la nécessaire évolution d'une ingénierie système traditionnelle basée sur les documents vers une ingénierie centrée sur les modèles (Figure 26) afin de prendre en compte la dimension collaborative et interdisciplinaire de l'ingénierie (Nugent & Collar, 2015). En effet, jusqu'alors les documents, en tant que résultats des processus d'ingénierie système, étaient le principal moyen de communication et de partage entre les différentes parties-prenantes d'un projet (Micouin, 2011).

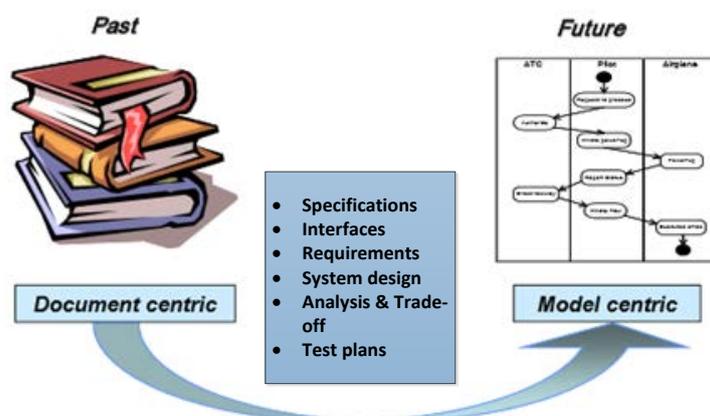


Figure 26 : Vision de l'INCOSE pour 2020 – Transition de l'ingénierie système basée sur les documents vers une ingénierie basée sur les modèles (INCOSE, 2007)

Bien que l'ingénierie système basée sur les documents ait montré son efficacité dans le passé, elle atteint ses limites dans la prise en compte des systèmes de plus en plus complexes, et pour lesquelles l'ingénierie basée sur les modèles apporte des réponses en simplifiant leur conception en automatisant un grand nombre d'activités, tout en améliorant la communication entre les différentes parties prenantes (Tableau 4).

		Conception système centrée modèles	Conception système centrée documents
Fonctions	Référentiel des informations	Modèles	Documents
	Reuves	Par interrogation de modèles (automatisée)	Lecture et interprétation du texte puis comparaison
	Vérification	Implicite, incrémentale, automatisée, Co-simulation modèle local/ total	Processus d'audit humain
	Communication	Reproductible et consistante Un modèle de référence	Les réponses peuvent dépendre des perspectives des lecteurs
	Validation	Exécutée dans différents contextes Co-simulation modèle global	Révisions, revues de papiers
	Traçabilité	Intégrale	Au prix d'un effort intensif
	Réutilisation	Librairies, Patron de conception	Paragraphe standard uniquement

Tableau 4 : Comparaison des approches d'ingénierie système basées sur documents et basées sur les modèles – adapté de (Rochet, 2007)

Partie 1 : Contexte opérationnel et d'ingénierie interdisciplinaire du système de conduite CISPI

L'Ingénierie Système Basée sur les Modèles (ISBM) « *Model Based Systems Engineering (MBSE)* » consiste en l'utilisation de langages de modélisation comme supports aux activités d'ingénierie système : conception, analyse, vérification et validation des systèmes, débutant de la phase de conception préliminaire et se poursuivant à travers le développement jusqu'aux dernières phases de vie du système (INCOSE, 2007). L'utilisation de modèles dans un processus d'ingénierie système présente de nombreux avantages (Friedenthal, Moore, & Steiner, 2008) :

- Capture de la connaissance spécialiste compréhensible et partagée avec l'ensemble des parties prenantes
- Amélioration de la communication entre les différents domaines d'ingénierie spécialiste impliqués dans le projet, les architectes systèmes et les clients
- Meilleure cohérence entre les différentes vues du système
- Capture des spécifications et des données de conception dans un format normalisé et neutre
- Exigences vérifiables (au plus tôt dans le processus d'ingénierie par co-exécution de modèles ou preuve formelle)
- Meilleure traçabilité entre les exigences, les données de conception, les analyses et tests
- Evaluation de l'impact des modifications facilitée
- Capitalisation de la connaissance, de patrons de conception, librairie de composants réutilisés dans plusieurs projets
- Réduction des erreurs (vérification syntaxique et sémantique des modèles) et tests d'intégrations rapides
- Génération automatique de documents

2.2.2.2. Modélisation d'architecture système

La modélisation apparaît comme une technique au service de l'ingénieur système pour l'assister dans la définition de l'architecture d'un système. En ce sens, il s'agit pour l'ingénieur système de coupler l'ensemble des modèles d'ingénierie interdisciplinaires et constitutifs du système, à travers leurs multiples interactions. Cette modélisation systémique tient alors compte :

- Du point de vue structurel du système représentant les composants logiques ou physiques reliés par des liens d'interfaces entre eux et avec les éléments de l'environnement
- Du point de vue comportemental du système représentant ce que font ses éléments, l'enchaînement de leurs interactions ainsi que les flux échangés.

Notons que cette modélisation du « système-à-faire » (M_H) est classiquement effectuée de manière itérative où l'architecte-système modélise son système cible à l'aide d'un mécanisme de concrétisation progressive (Krob, 2009) consistant à modéliser le système selon trois niveaux d'abstraction (Figure 27) :

- Opérationnel (*centré sur l'extérieur du système*) : qui a pour but de définir le pourquoi du système, autrement dit le système est vu comme une boîte noire rendant les services attendus à son environnement. D'un point de vue structurel, il s'agit de représenter la boîte noire système dans son contexte, c'est-à-dire en relation avec les éléments de son environnement. D'un point de vue comportemental, il s'agit de représenter les scénarios de comportement du système vis-à-vis des éléments de son environnement.
- Fonctionnel (*centré sur l'intérieur du système*) : qui a pour objectif d'explicitier le fonctionnement du système indépendamment de la façon dont il le réalisera. D'un point de vue structurel, il s'agit de

Partie 1 : Contexte opérationnel et d'ingénierie interdisciplinaire du système de conduite CISPI

représenter une vision statique décrivant l'agencement des fonctions ou blocs fonctionnels. D'un point de vue comportemental, il s'agit de représenter les enchainements d'activités de ces fonctions.

La simple connaissance des composants concrets d'un système et de leurs lois d'interaction n'est jamais suffisante pour décrire le comportement d'un système intégré résultant de leur interconnexion. Cela explique pourquoi il existe toujours des modèles purement fonctionnels d'un système dont le rôle est bien d'exprimer les fonctions émergentes que l'on ne pourra pas lire au niveau organique (Krob, 2012).

- Organique (*centré sur l'intérieur du système*) : qui définit la façon dont le système est concrètement réalisé. D'un point de vue structurel, il s'agit de représenter l'organisation des composants matériels, logiciels et humains entre eux. D'un point de vue comportemental, il s'agit de représenter la dynamique de ces composants matériels.

Notons que dans le paradigme RFLP (Requirement, Functional, Logical, Physical) (Kleiner & Kramer, 2013) que nous avons retenu pour ces travaux, le niveau organique se compose de deux niveaux d'abstractions :

- Logique : qui définit comment le système est implémenté selon un agencement de constituants logiques représentent une abstraction des composants physiques
- Physique : qui définit une définition virtuelle des composants physiques (du monde réel) au sein d'une maquette numérique physique du système

Nos travaux présentés dans la partie 3 de ce mémoire relatifs à la définition d'un modèle du « système-à-faire » (M_h) de conduite de la plate-forme CISPI du CRAN, se situent au niveau d'abstraction fonctionnel. Ceux présentés en partie 4 se situent au niveau d'abstraction logique à travers la définition de modèles de « constituants à faire » (M_h) d'actionnement et de mesure intelligents.

Bien que ces différents points de vue et niveaux d'abstractions contribuent à la modélisation du « système-à-faire » (M_h), ils sont également source d'erreurs de cohérence et d'intégration entre modèles constitutifs de parties (M_h) d'ingénierie spécialistes. Les cadres de modélisation de système peuvent apporter une solution à cette problématique pour se repérer face à la multitude de types de modèles. En ce sens, nous nous focalisons sur la synthèse récente des cadres de modélisation des architectures des systèmes d'informations et matériels (Zachman (Zachman, 1987), SAGACE (Penalva, 1997), MODAF (Ministry of Defence Architecture framework), DoDAF (Department of Defence Architecture Framework),...) réalisée par (Krob, 2012) pour proposer un cadre de modélisation systémique (Figure 28). Ce cadre d'architecture système repose sur une définition d'un système selon un modèle mathématique (*Système formel*) qui nous est apparu en adéquation avec le système cible étudié (système de conduite de la plate-forme CISPI).

Un système formel S (Figure 29) est caractérisé d'une part par la donnée d'ensemble d'entrées X , de sortie Y et d'états internes Q et d'autre part les deux types de comportements suivants qui lient ces variables systémiques au cours du temps :

- *Un comportement fonctionnel qui produit une sortie $y(t) \in Y$ à tout moment t du temps en fonction d'une entrée $x(t) \in X$ et de l'état interne courant $q(t) \in Q$ du système ;*
- *Un comportement interne qui fait évoluer l'état interne $q(t) \in Q$ du système au cours du temps t sous l'action d'une entrée $x(t) \in X$ du système*

Partie 1 : Contexte opérationnel et d'ingénierie interdisciplinaire du système de conduite CISPI

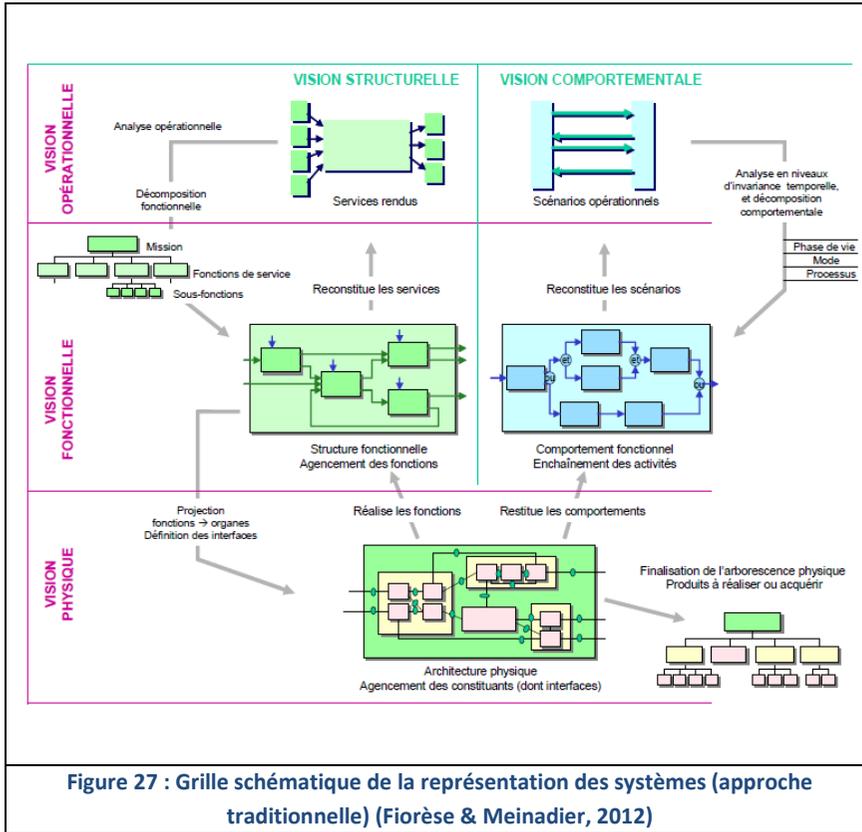


Figure 27 : Grille schématique de la représentation des systèmes (approche traditionnelle) (Fiorèse & Meinadier, 2012)

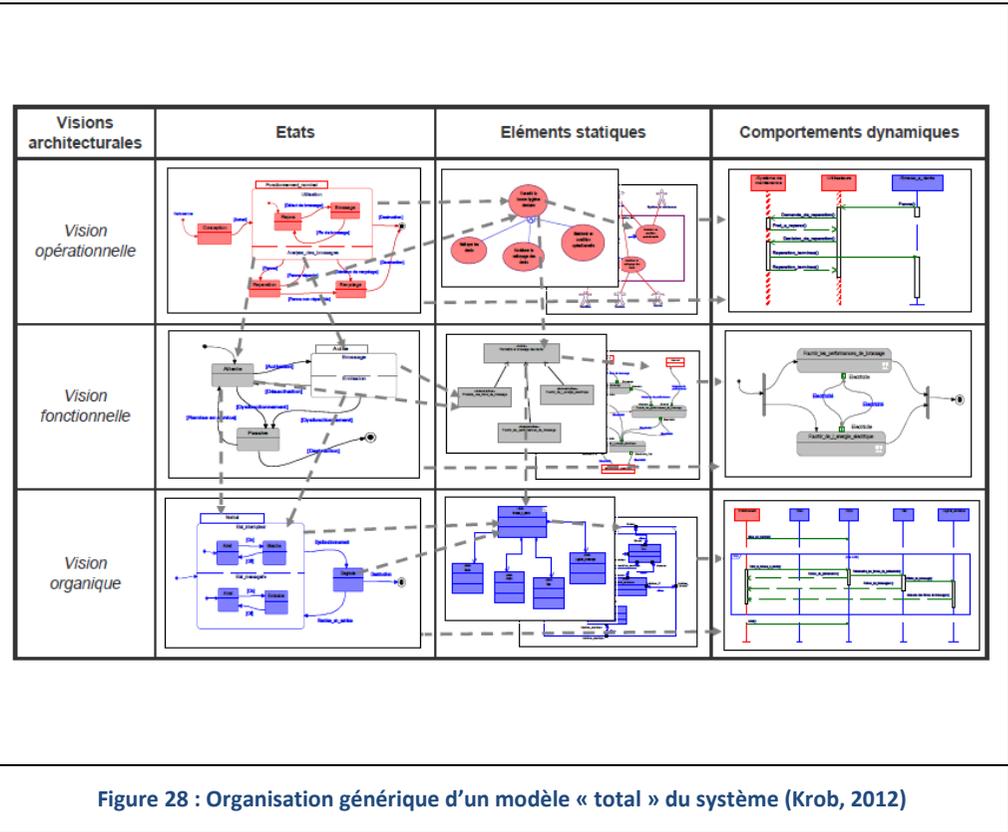


Figure 28 : Organisation générique d'un modèle « total » du système (Krob, 2012)

Partie 1 : Contexte opérationnel et d'ingénierie interdisciplinaire du système de conduite CISPI

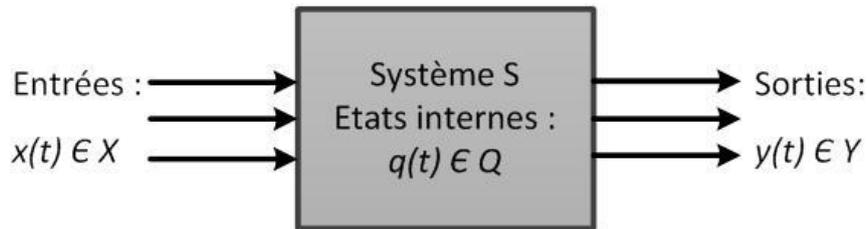


Figure 29 : Vision classique d'un système formel (Krob, 2012)

De cette définition formelle d'un système, (Krob, 2012) définit trois points de vues à considérer lors de la définition d'un système à chaque niveau d'abstraction d'architecture (opérationnelle, fonctionnelle et organique (vue dans ce cas à travers le niveau logique) :

- Etats du système : regroupant les représentations statiques (listant des états) et dynamique (évolution des états)
- Description statique des comportements du système (listant les composants ainsi que leurs entrées-sorties)
- Description dynamique des comportements du système (entrée/sortie)

A partir de ce cadre théorique (Figure 28), (Krob, 2012) identifie les artefacts de modélisation permettant de représenter les architectures d'un système industriel selon la quasi-totalité des langages de description architecturale. Parmi ces langages, il s'intéresse notamment au langage de facto de l'ingénierie système : SysML²³ (System Modeling Language) pour lequel il recommande l'utilisation des diagrammes suivants : Le diagramme de bloc (**systèmes et objets métiers**), la machine à états (**états**), le diagramme de bloc interne (**structure syntaxique d'un opérateur d'intégration**), le diagramme d'activité ou de séquence (**comportement dynamique induit par un opérateur d'intégration**) et le diagramme d'exigences (**conditions sur le comportement observable d'un système**). Selon nous, ces diagrammes permettent de représenter uniquement des systèmes discrets dont les comportements peuvent être représentés par un ensemble d'états. En ce sens, nous montrons dans le chapitre 5 de ce mémoire l'intérêt des diagrammes paramétriques SysML pour la modélisation des systèmes continus tels que le procédé physique ciblé de la plate-forme CISPI .

2.2.2.3. Virtualisation d'un modèle d'architecture système

Un nouveau paradigme en ingénierie système introduit l'exécution du modèle (M_h) total d'une faisabilité de la situation étudiée comme étant un vecteur d'intégration entre l'ensemble des modèles constitutifs de parties (M_p).

*A **paradigm shift** is occurring within Systems Engineering, where the level of complexity of system-projects can only accurately and precisely be modeled by a modeling construct that is executable Whole-system design means optimizing not just parts but the entire system. Everything must be considered simultaneously and teased apart to reveal mutually helpful interactions (Garcia, 2009) .*

²³ SysML (System Modeling Language) : est le langage de-facto de l'ingénierie système supportant les activités de spécification, d'analyse, de conception de vérification et de validation d'un large éventail de systèmes complexes (OMG, 2010). Nous détaillons dans le chapitre 4 le langage SysML.

Partie 1 : Contexte opérationnel et d'ingénierie interdisciplinaire du système de conduite CISPI

Cela nécessite de la part de l'ingénieur système de « penser système (M_H) », en rupture avec l'analyse traditionnelle de « penser solution (M_I) », en se préoccupant de la façon dont les parties (M_h) interagissent pour reproduire ou transformer l'ensemble (HB Lawson, et al., 2005-2014) afin de satisfaire les exigences des parties prenantes. En ce sens, cette approche systémique sous-tend des capacités d'interactions interdisciplinaires pour architecturer l'ensemble des connaissances spécialistes encapsulées à l'intérieur des modèles (M_h). Ce travail est facilité aujourd'hui par des technologies numériques de modélisation et de simulation de plus en plus matures permettant la création d'un modèle virtuel de faisabilité (M_I) interdisciplinaire et exécutable du système pour en faciliter sa conception. Nous développons par la suite deux de ces techniques d'exécution de modèles :

Full-integration

La full-integration consiste à capturer l'ensemble des modèles spécialistes au sein d'un même outil, langage exécutant le comportement global du système. Cette technique présente les défauts de ses qualités : l'ensemble des modèles spécialistes sont facilement intégrables avec l'ensemble des autres modèles mais elle limite le choix des outils, langage et méthode d'ingénierie.

Parmi les travaux d'ISBM utilisant cette technique d'intégration système, nous nous sommes intéressés aux récents travaux de (Retho, 2015). Ce dernier montre l'intérêt d'un modèle d'intention exécutable en architecture-système comme pivot d'une collaboration multidisciplinaire agile (Figure 30).

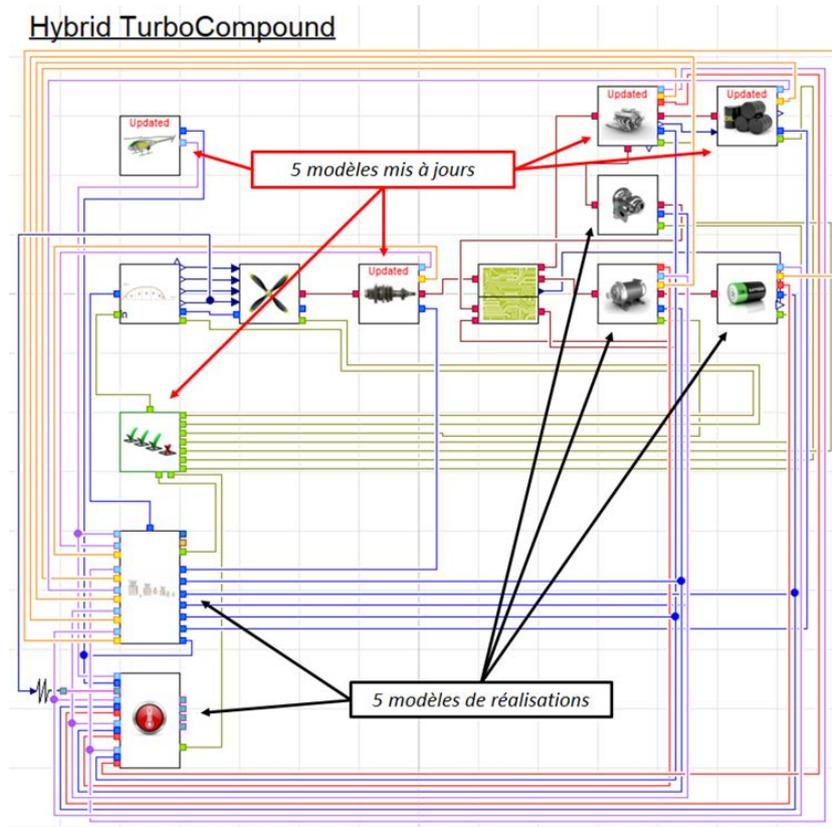


Figure 30 : Modèle d'intention (en vert) constitutif d'un modèle architectural multi-physique exécutable (Retho, 2015)

Partie 1 : Contexte opérationnel et d'ingénierie interdisciplinaire du système de conduite CISPI

De façon plus détaillée, ces travaux s'intéressent au lien entre la conception totale conduite par le domaine d'ingénierie système et la conception basée sur la physique du monde réel au moyen de l'analyse des interactions et des impacts multidisciplinaires qui apparaissent dans le système. L'application de cette information pour la construction d'un modèle d'intention permet ensuite la requête de modèles comportementaux auprès de domaines d'ingénieries spécialistes. Afin de concentrer ces modèles d'ingénieries spécialistes autour de la construction du modèle d'intention, (Retho, 2015) fait le choix d'un langage unique d'intégration pour la représentation multidisciplinaire comportementale du système virtuel, à savoir le langage Modelica pour la modélisation des systèmes multi-physiques. A travers la recherche de connaissances vers les domaines d'ingénieries spécialistes pour construire un modèle virtuel du système, cette méthodologie est à la tangente de notre heuristique de co-spécification système développée dans ce mémoire. Néanmoins la modélisation du système virtuel (M_v) ne nous apparaît pas suffisamment intégrée à une modélisation système récursive pour comprendre le réel (M_H). De plus nous estimons que le choix d'un langage unique pour la construction des modèles disciplinaires limite les domaines d'ingénieries spécialistes dans l'expression de leurs connaissances métiers. Une technique d'intégration système permettant de contourner cette problématique est la co-simulation de modèles exécutables.

Co-Simulation

La co-simulation consiste à exécuter l'ensemble des modèles d'ingénierie spécialistes dans chacun de leurs outils spécialistes dédiés. Ces modèles interopèrent les uns avec les autres autour d'un bus de co-simulation en charge d'orchestrer l'échange des données entre modèles. Cela va dans le sens du projet européen ITEA 2 (Information Technology for European Advancement) Modelisar où un consortium d'entreprises conduit par l'éditeur de logiciel Dassault Systems ont initié la création d'un nouveau standard²⁴ : FMI (Functional Mock-up Interfaces) pour l'échange de modèles et la co-simulation (Figure 31).

The Functional Mock-up Interface (FMI) standard enables co-simulation which is the ability to dynamically interoperate multiple related models for improving model-based design between *original equipment manufacturer and supplier* (Blochwitz, et al., 2012).



Figure 31 : Evolution interdisciplinaire de l'Ingénierie Système Basée sur des Modèles (Blochwitz, et al., 2012)

²⁴ <https://www.fmi-standard.org/>

Partie 1 : Contexte opérationnel et d'ingénierie interdisciplinaire du système de conduite CISPI

L'objectif de ce standard est de fournir les règles d'interfaces entre différents environnements d'ingénierie afin d'évaluer par co-exécution de modèles un ensemble d'équations différentielles algébriques ou discrètes décrivant le comportement d'un système multidisciplinaire. Notons que ce standard apparaît aujourd'hui comme un candidat prometteur d'un point de vue industriel pour la co-simulation et les collaborations inter-entreprises (Bertsch & Schulmeister, 2014).

2.3. Caractérisation d'une ingénierie de conduite centrée humain

L'ingénierie système s'est historiquement développée pour la conception de systèmes composés en grande partie de constituants techniques.

The classical systems (i.e., the system-as-machine paradigm) were small to large scale, multidisciplinary, relatively stable and predictable, without people as component, and were typically from the aerospace and defence industries. The new ones (i.e., the system-as-organism paradigm), which must cope with the global challenges of sustainable development, are large scale, complex, adaptive, interoperable, scalable, technology intensive, human integrative and comprise (Ramos, Ferreira, & Barceló, 2012).

En ce sens, l'ingénierie système traditionnelle ne permet pas d'appréhender toute la complexité itinérante à la prise en compte des constituants humains composant les systèmes socio-techniques. Cependant, cette constituante humaine reste à l'heure actuelle majoritaire dans les systèmes de conduite étudiés, il est alors nécessaire de s'orienter vers des ingénieries centrées humains, afin de tirer profit de leur capacités, sans en subir les effets perturbateurs.

2.3.1. Intégration Machine-Homme

Cela nous amène à nous intéresser au cadre d'ingénierie pour les systèmes_{Homme-Machine} critiques défini par (G. Boy, 2005): la pyramide AUTOS (Figure 5a) synthétisant un ensemble de travaux d'ingénierie centrée humain (Rasmussen, 1986), (Norman, 1986), (Amalberti, 1996), (Javaux & De Keyser, 1997) et (Vicente, 1999). Ce cadre d'ingénierie définit cinq domaines d'un système_{Homme-Machine} ainsi que les interactions entre ces domaines à prendre en compte pour la conception centrée humain. Ainsi, appliqué à notre cas d'étude, le cadre AUTOS permet l'étude d'une **Situation** système de conduite de l'**Artefact** de contrôle-commande de la plate-forme CISPI par des **Utilisateurs** (opérateurs humains) faisant partie d'une **Organisation** et exécutant différentes opérations (**Task**) de conduite. La pyramide AUTOS nous a notamment permis de caractériser la situation système de conduite de la plate-forme CISPI dans le chapitre 1.

Ce cadre d'ingénierie fait cependant apparaître une dichotomie entre les ingénieries centrée technique (**Artifact**) et les ingénieries centrée humaine (**User**) au cours de la conception globale d'un système_{Homme-Machine} où l'utilisateur final du système n'est pas perçu comme un constituant du système mais comme un élément en interaction avec ce dernier. Ce constat montre qu'il n'existe pas véritablement d'ingénieries centrées système à même de construire un modèle (M_{μ}) du « système-à-faire », mais plutôt un ensemble d'ingénierie (*centrée technique ou centrée humain*) contribuant à la construction d'un ensemble de modèles de « constituants-à-faire » (M_h). En ce sens, cette vision système requiert une évolution des pratiques courantes d'ingénieries traditionnelles (Ruault, Vanderhaegen, & Luzeaux, 2012) afin de prendre en compte au plus tôt, des modèles de faisabilités techniques ou ergonomiques en réponse au dilemme de la répartition des fonctions de conduite entre des agents techniques ou humains (Figure 32).

Partie 1 : Contexte opérationnel et d'ingénierie interdisciplinaire du système de conduite CISPI

Le dilemme du concepteur peut être résumé comme suit : d'un côté, il est tenté d'encadrer voire limiter l'activité humaine dans les situations connues pour se prémunir d'éventuelles erreurs, mais de l'autre, il ne peut compter sur l'inventivité humaine pour gérer l'inattendu (Millot, 2014).

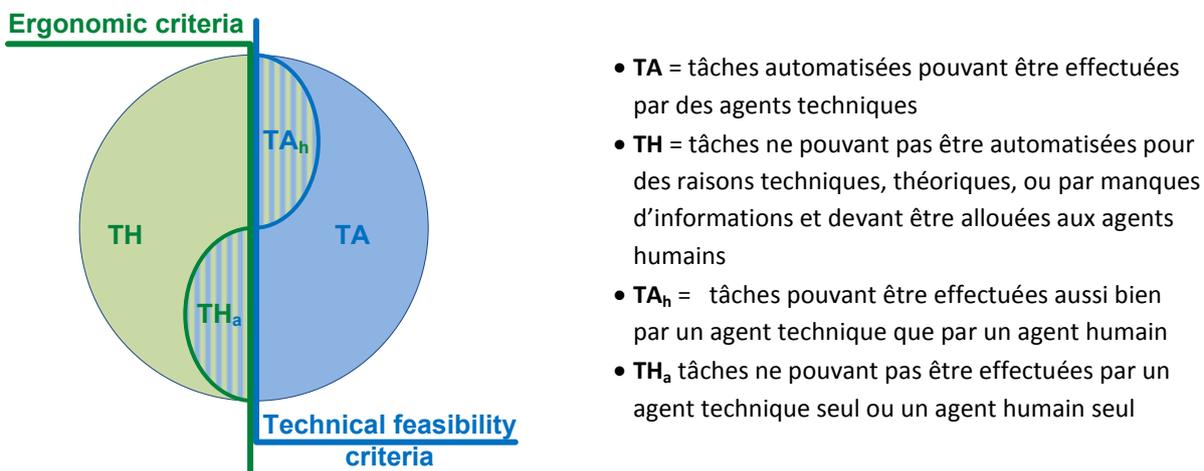


Figure 32 : Répartition des tâches de conduite entre des agents techniques ou humains (Millot, Debernard, & Vanderhaegen, 2011)

Ce dilemme fait émerger le besoin d'un consensus pour concevoir les systèmes socio-techniques comme des systèmes techniques (Kroes, Franssen, Poel, & Ottens, 2006) en unifiant l'ingénierie système (*orientée technique*) avec l'ingénierie centrée humain « *Human Centered Engineering – HCE* » dans le but d'évoluer vers une intégration de l'humain et du système « *Human System Integration – HSI* ».

2.3.2. Virtualisation d'un modèle d'intégration Machine-Homme

A l'instar de l'ingénierie système orientée technique, (G. A. Boy & Narkevicius, 2014) recommande l'utilisation des techniques de modélisation et de simulation au plus tôt de la conception du système pour atteindre ces objectifs d'intégration.

Incorporating HSI into SE resulted in identifying and incorporating human capabilities and limitation in system development. Human Centred Design brings a methodology and philosophy to leading the design process prior to engineering and feeding forward solutions that can be successfully introduced into the society and organizations that will use the system. Requirements should be human centred, but the main asset of modern technology is to provide Modelling and Simulation from the very beginning of a design project (G. A. Boy & Narkevicius, 2014).

Des initiatives dans le domaine de la physiologie permettent d'envisager la construction de modèles exécutables du comportement « physiologique » humain. Cela se concrétise par le développement d'un outil : PhysioMatica™ (Bennani, Chauvet, & Dupont, 2010) pour la modélisation et la simulation des fonctions physiologiques intégrés du vivant, ou bien encore la création d'une bibliothèque Modelica : Physiobrary (Mateják, et al., 2014) contenant des lois physiques de base régissant la physiologie humaine. Cette librairie est ainsi utilisable pour la circulation cardio-vasculaire, les processus métaboliques, la distribution des nutriments,

Partie 1 : Contexte opérationnel et d'ingénierie interdisciplinaire du système de conduite CISPI

la thermorégulation, le transport de gaz, la régulation de l'électrolyte, la distribution de l'eau, la régulation hormonale et la réglementation pharmacologique. Notons cependant que l'ensemble de ces initiatives restent dans le domaine de l'ingénierie centrée humain sans prendre en compte les interactions avec les systèmes techniques contrairement aux travaux de (Lieber, 2013) relatifs à l'ingénierie d'un système support de maintenance aéronautique et auxquels nous avons contribué. Lieber propose ainsi une méthode pour s'assurer que le comportement des systèmes_{Machine-Homme} dépendant des synergies entre les différentes interactions prenant place entre les constituants techniques et humains, soit maintenu dans un domaine de performances acceptables. En ce sens, le paradigme exploré se fonde sur la possibilité de faire interopérer des modèles de processus physiologiques avec des modèles de processus techniques en spécification d'interaction Machine-Homme, en combinant un cadre de modélisation système avec celui mathématique et computationnel de la physiologie intégrative (que nous détaillerons dans le chapitre 8 de ce mémoire). L'intégration de ces modèles techniques (*SysML*) et humains (*Simulink*) a été mis en œuvre par une technique de code-generation afin de s'assurer par simulation du respect des performances du système global. Cette technique requiert que l'ensemble des modèles d'ingénieries spécialistes soient transformés en langage de programmation (*C/C++*), pour être ensuite importés dans un outil d'ingénierie système exécutant de façon intégrée l'ensemble du code généré à partir des différents modèles. Notons que cette technique, dépendante des transformations de modèles vers des langages de programmation au sein des différents outils d'ingénieries, ne permet pas d'assurer que le code généré reflète correctement le comportement spécifié.

2.4. Caractérisation d'une ingénierie centrée système

Le dilemme évoqué précédemment soulève la question de déterminer au cours de la conception d'un système qualifié de complexe tel que les systèmes sociotechniques de conduite d'un procédé industriel critique, les critères permettant de trancher sur une alternative d'architecture de conduite plutôt qu'une autre. Il apparaît que l'ingénieur centré système ne peut se contenter de la seule connaissance de ces faisabilités techniques ou ergonomiques. Il est alors primordial pour lui de prendre une décision en bouclant sur la réalité d'où proviennent les exigences parties prenantes et dans laquelle sera implémenté le futur système. En ce sens, nous caractérisons une ingénierie centrée système en tant qu'ingénierie bouclée à la fois sur la réalité (domaine opérationnel) et sur ses constituants (domaines spécialistes).

Cette vision centrée système rejoint l'approche DSA²⁵ (Distributed Situation Awareness) (PM Salmon, Stanton, Walker, & Jenkins, 2009) initialement issue de l'étude des processus cognitifs en environnement opérationnel, que nous transposons à un environnement d'ingénierie collaborative (Yufei & Kazuo, 2005). Ainsi, la DSA considère les systèmes sociotechniques comme un TOUT (une entité) en interaction avec son environnement en termes de phénomènes ou de stimuli. En ce sens, cette approche revisite l'approche SA (Situation Awareness) en la considérant comme une propriété émergente des systèmes complexes sociotechniques plutôt qu'une initiative individuelle (Artman & Garbis, 1998). La conscience de la situation (SA) est considérée comme la connaissance d'une organisation dynamique maintenue grâce à des informations recueillies par un individu à travers la perception de l'environnement de la situation système. La SA est ainsi vu comme le produit résultant d'un processus d'évaluation de la situation comprenant les trois étapes suivantes (Figure 33) (Endsley, 1995):

- Niveau 1 (**Level 1**) : Perception des éléments de l'environnement dans un espace-temps
- Niveau 2 (**Level 2**) : Compréhension de la situation courante

²⁵ DSA (Distributed Situation Awareness) = conscience de la situation distribuée

Partie 1 : Contexte opérationnel et d'ingénierie interdisciplinaire du système de conduite CISPI

- Niveau 3 (**Level 3**) : Projection de leurs états dans le futur

Les approches DSA supposent que les systèmes sociotechniques possèdent des propriétés cognitives (comme la conscience de la situation) qui ne sont pas une partie d'une cognition individuelle mais le résultat de propriétés émergentes d'un système cognitif collaboratif vue comme un TOUT. (Artman & Garbis, 1998) suggère que la SA d'une équipe soit distribuée non seulement aux agents humains (ingénieurs) constituant l'équipe, mais également aux agents techniques (Artefact) utilisés dans le but d'atteindre la finalité du système. Par exemple dans la Figure 34 « quatre agents humain travaillent de façon collaborative mais sont répartis les uns par rapport aux autres. La conscience de la situation (SA) est initialement à un niveau système pour que ce dernier fonctionne de façon efficiente. Cette information est ensuite partagée entre l'ensemble des agents humains assistés d'agents techniques. En ce sens, les approches DSA ne prétendent pas que les perspectives individuels sont redondantes, elles fournissent des approches complémentaires pour décrire une SA dans un environnement collaboratif » (P Salmon, et al., 2008).

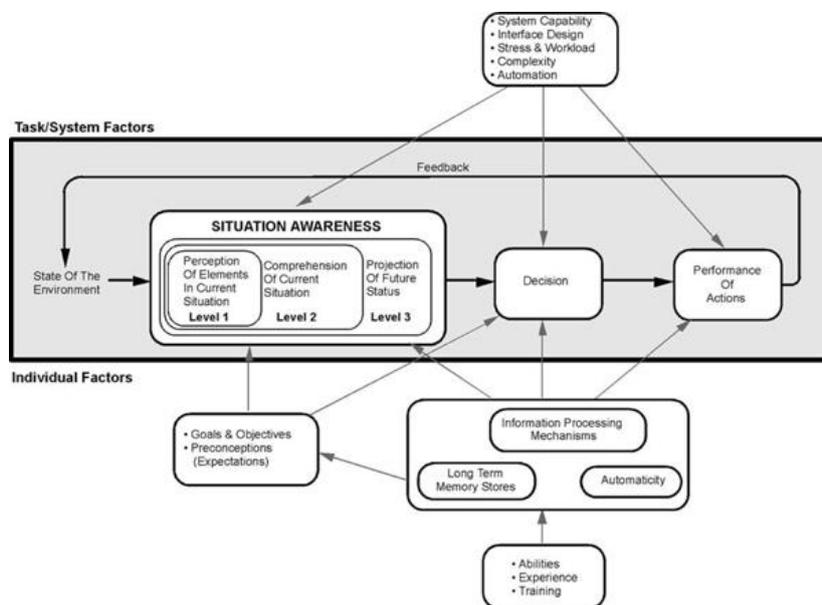


Figure 33 : Modèle d'un processus d'évaluation d'une situation (Endsley, 1995)

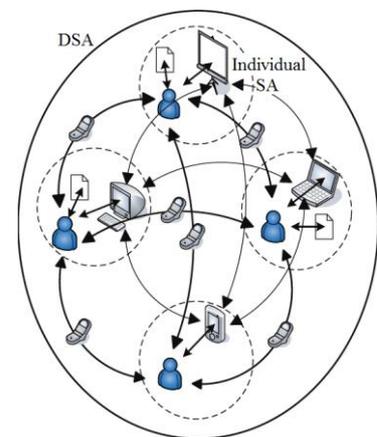


Figure 34 : Exemple d'une DSA (Distributed Situation Awareness) (P Salmon, et al., 2008)

2.5. Conclusion : Environnement de modélisation centré sur le système CISPI constitutif de la situation-système d'ingénierie ciblée

L'objectif de ce chapitre était de présenter le contexte d'ingénierie interdisciplinaire pour la conception d'un système_{Machine-Homme}. En ce sens, nous nous sommes focalisés sur les ingénieries centrées technique et humain afin de montrer leurs limites dans la prise en compte de l'intégration des agents techniques avec des agents humains. Nous avons également statué sur l'apport d'une ingénierie basée sur des modèles exécutables et centrée système afin de pallier la dichotomie courante entre ces ingénieries interdisciplinaires. En ce sens, une ingénierie centrée système s'appuie sur un ensemble de modèles de faisabilité interdisciplinaires (M_h) pour construire un modèle virtuel de faisabilité (M_v) du système au regard d'un modèle (M_H) d'une situation opérationnelle réelle.

Partie 1 : Contexte opérationnel et d'ingénierie interdisciplinaire du système de conduite CISPI

Il ne faut pas oublier que derrière ces modèles, se cachent un ensemble d'ingénieries spécialistes et de ce fait un ensemble de connaissances spécialistes. Afin de ne pas contraindre ces ingénieries par un outil, un langage ou une méthode lors de la formalisation de leurs connaissances métiers sous la forme de modèle de faisabilité, nous retenons la technique de co-simulation pour l'intégration de ces différents modèles (Figure 35). En effet, cette technique d'intégration système offre l'avantage aux différentes ingénieries spécialistes de rester dans leurs domaines d'expertises sans avoir à partager leurs méthodes, outils et modèles d'ingénierie des parties, tout en protégeant leur propriété intellectuelle.

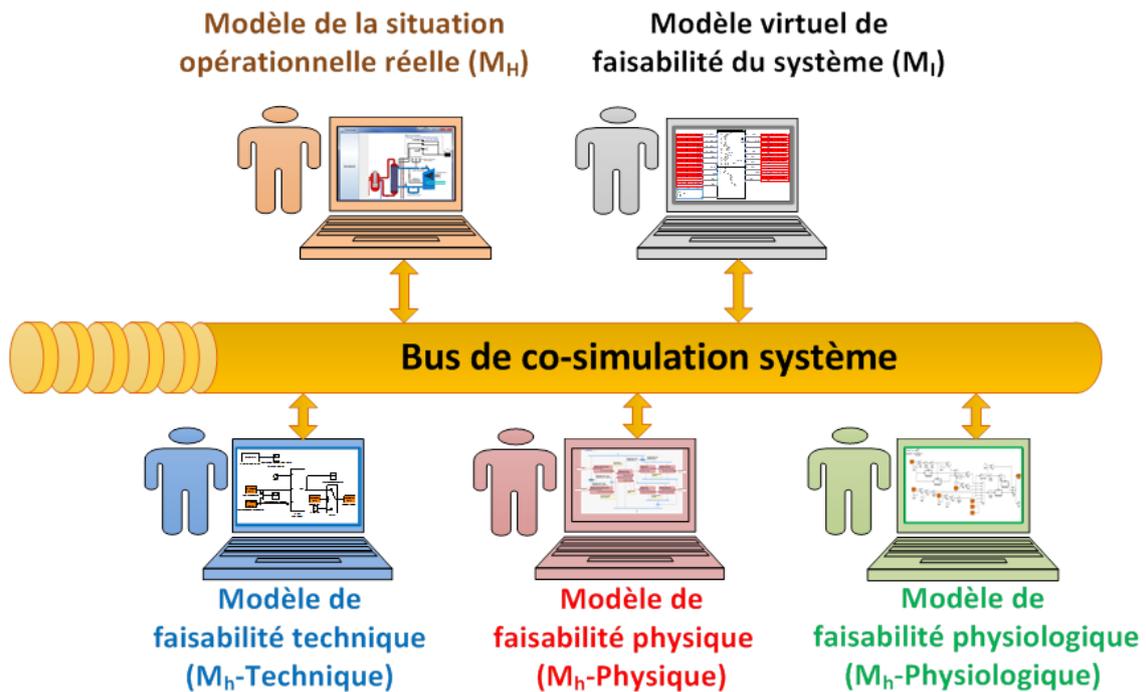


Figure 35 : Environnement collaboratif d'ingénierie centrée système basée sur des modèles exécutables

Partie 2 : Environnement de co-spécification exécutable basée sur des modèles du système de conduite CISPI

- PARTIE : à travers sa structure interne (connaissances des parties requises pour l'architecturer) tout en assurant un continuum de connaissances et modèles vers le développement SYSTEME selon (1).

La dimension itérative de notre approche s'appuie sur l'approche des « problem frames » pour étendre le paradigme de spécification d'exigences en génie informatique à celui d'une co-spécification SYSTEME itérative et interdisciplinaire basée sur des modèles.

En ce sens, nous détaillons dans le chapitre 4 notre environnement collaboratif d'ISBM qui permet de mettre les différents acteurs interdisciplinaires en situation de co-modélisation avec leurs propres environnements autour d'un bus de co-simulation (Figure 37). Nous concluons ce chapitre par la spécification des scénarios qui nous permettent de faire la preuve de concept de notre proposition en parties 3 et 4, au facteur d'échelle considéré.

Partie 2 : Environnement de co-spécification exécutable basée sur des modèles du système de conduite CISPI

pour conduire cette définition multi-échelle d'un SYSTEME. Le systémigramme de la Figure 47 représente quelques relations essentielles entre concepts de la définition multi-échelle d'un SYSTEME de (Kuras, 2006) qui ont fait aussi l'objet d'application par (Bjelkemyr & Lindberg, 2007) pour définir certaines caractéristiques de systèmes de systèmes de production futures.

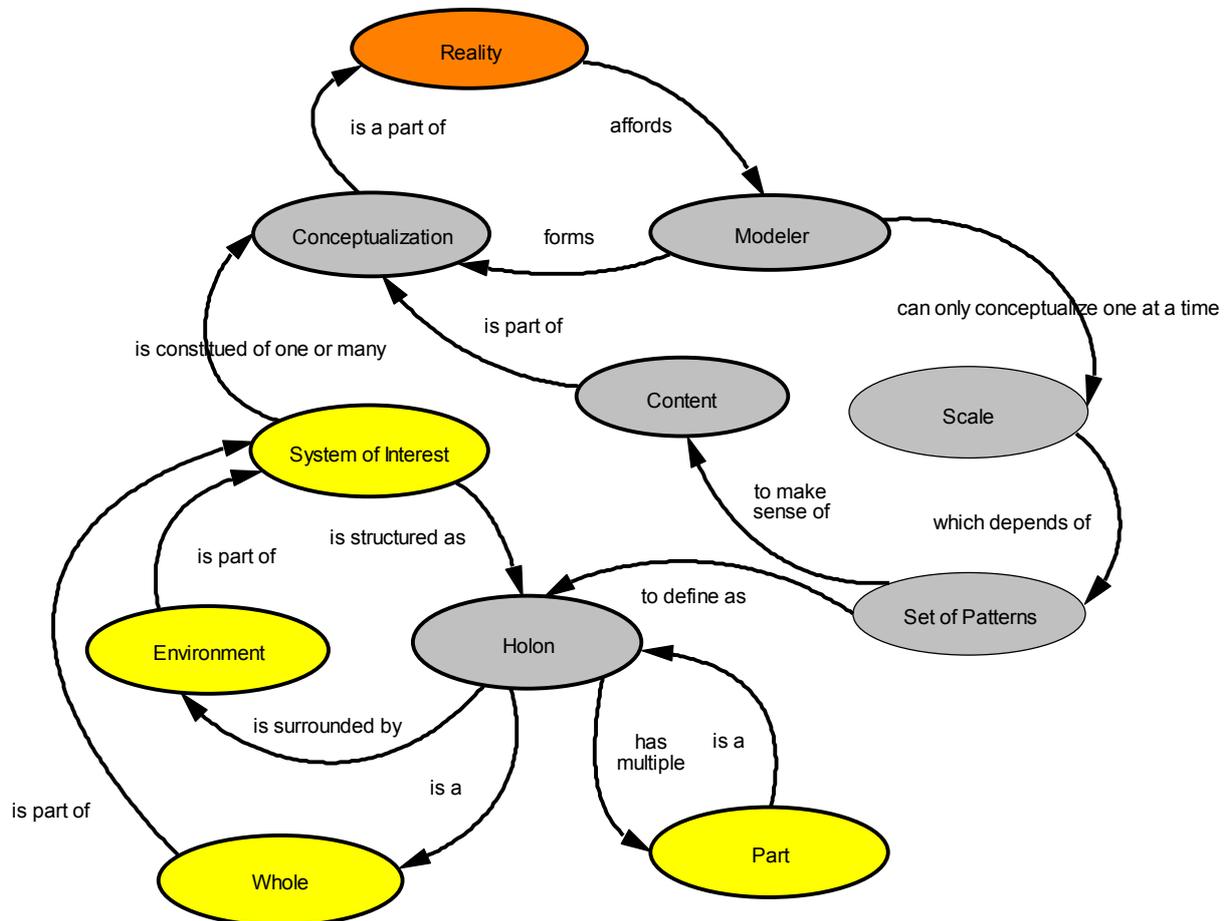


Figure 47 : Systémigramme de définition multi-échelle d'un SYSTEME d'intérêt

Dans ses travaux de recherche en « biology of systems » quant à ce qui constitue l'« ADN » d'un SYSTEME (Boardman & Sauser, 2006), l'équipe de recherche Systemics considère l'holon comme essentiel pour définir le degré d'autonomie de chacun des « Building Block » d'un système de systèmes en regard de la propriété d'**unité** (*en. togetherness*) requise par l'ensemble (Figure 48).

« We believe that the essence of a system is « togetherness », the drawing together of various parts and the relationships they form in order to produce a new whole. » (Boardman & Sauser, 2008)

Un holon est une entité qui est elle-même un TOUT composée de PARTIES, mais en même temps une PARTIE d'un ensemble plus vaste. Le paradigme holonique peut être utilisé de manière récursive ; ainsi chaque PARTIE d'un SYSTEME peut être considéré à la fois comme une entité vue de l'extérieur, et comme un ensemble de PARTIES en interactions vues de l'intérieur. Ce modèle s'applique également de sorte que le SYSTEME d'intérêt original peut être perçu comme une PARTIE en interaction d'un ou plusieurs systèmes plus larges.

Partie 2 : Environnement de co-spécification exécutable basée sur des modèles du système de conduite CISPI

4.5. Conclusion : Environnement collaboratif constitutif du processus de spécification-système exécutable ciblé

L'objectif de ce chapitre était de présenter notre environnement de co-spécification SYSTEME exécutable basée sur des modèles et de l'illustrer à travers un scénario de co-spécification de la plate-forme CISPI. Comme nous venons de le voir à travers ce scénario, ce sont les ingénieurs avec leurs connaissances respectives qui délivrent les (M_h) composant le modèle global (M_H) de compréhension du système en co-spécification. Au-delà, ce sont ces ingénieurs parties prenantes de notre environnement de co-spécification qui doivent être architecturés en **système pour faire** « en charge d'analyser le besoin, et d'étudier et concevoir un **système à faire** répondant aux mieux au besoin, compte tenu des potentialités et contraintes de son propre environnement » (Fiorèse & Meinadier, 2012). En ce sens, notre environnement vise à supporter le comportement global de ce « système pour faire » en facilitant la requête itérative de connaissances interdisciplinaires pour spécifier le « système à faire » en partageant à l'essentiel des éléments de raisonnement, de modélisation, de langage et de travail communs tout en préservant la spécificité de chaque métier.

Notons également que cet environnement de co-spécification exécutable basée sur des modèles soulève des questions relatives à la co-simulation concernant la configuration du bus de co-simulation et des différents outils de simulation, afin de garantir le comportement global du SYSTEME en simulation. Si nous avons fait œuvre d'architecte de co-simulation dans notre cas d'étude, ce rôle d'interaction avec l'ingénieur système au facteur d'échelle industriel peut faire l'objet d'un nouveau métier (Retho, 2015) nécessitant le développement d'une heuristique de co-simulation le guidant dans son travail.

Partie 2 : Environnement de co-spécification exécutable basée sur des modèles du système de conduite CISPI

de modèles spécialistes (M_h) en interaction et architecturés par l'ingénieur système en un modèle SYSTEME (M_H), afin de satisfaire les exigences parties prenantes. Cet environnement de co-modélisation profite des évolutions récentes des technologies numériques notamment des bus de co-simulation afin de vérifier/valider le comportement global du SYSTEME par co-exécution de modèles.

Dans la suite de ce mémoire, nous illustrons la mise en œuvre de notre heuristique de co-spécification SYSTEME pour la définition de la plate-forme CISPI du CRAN tel que définis par le scénario précédent. Nous mettons en évidence l'apport de cette heuristique pour la construction itérative du modèle holistique de notre SYSTEME d'intérêt selon un ensemble de modèles des parties prescrit par les domaines d'ingénieries spécialistes (procédé, d'automatisation, sûreté, physiologique, fournisseur d'actionnement intelligent).

Partie 3 : Co-spécification exécutable de constituants de conduite du procédé du système CISPI

Dans le domaine de l'hydraulique le processus T est vu comme un processus de transport, correspondant à la classe de processus de transformations d'énergie en puissance selon (21). Ainsi la transformation opérée par le processus T prend la forme suivante $\{(V, Pr), (Pp, Qv)\} \rightarrow (Pr, Qv)$ où le couple (Pp, Qv) représente une énergie cinétique. Selon les règles définies dans le paragraphe 5.3.1.3, un processus de type T ne peut succéder qu'à un processus de type A, or l'énergie cinétique en sortie d'un processus de type A dans le domaine de l'hydraulique est nulle. Ceci nous amène à reconsidérer le processus T selon la transformation $(V, Pr) \rightarrow (Pr, Qv)$ avec $Qv = \frac{dV}{dt}$ (Tableau 13).

Représentation du processus dans le domaine de l'hydraulique	Relation d'entrées-sorties
	<p>On a : $Pr_0 = Pr_2$ (Pa)</p> <p>De plus, d'après le théorème de Bernoulli :</p> $Pr_a(t) + \frac{1}{2} \rho * v_a(t)^2 + \rho * g * z_a(t) = Pr_b(t) + \frac{1}{2} \rho * v_b(t)^2 + \rho * g * z_b(t)$ <p>Avec :</p> <ul style="list-style-type: none"> $Pr_a(t) = Pr_1(t)$ pression à la surface du stockage (Pa), $v_a(t)$ = vitesse de l'eau à la surface du stockage = 0 (m.s⁻¹), $z_a(t)$ = hauteur de l'eau dans la cuve de stockage = $\frac{V_0(t)}{Section_{Stockage}}$ (m) $Pr_b(t) = Pr_0(t)$ pression de l'eau à la sortie du stockage (Pa), $v_b(t)$ = vitesse de l'eau à la sortie du stockage (m.s⁻¹), $z_b(t)$ = hauteur de l'eau au fond de la cuve = 0 m ρ = Masse volumique de l'eau = 995.58 kg.m⁻³ g = Constante gravitationnelle = 9.80665 m.s⁻² <p>→ $v_b(t) = \sqrt{\frac{2*(Pr_1(t) - Pr_0(t))}{\rho} + 2 * g * \frac{V_0(t)}{Section_{Stockage}}}$</p> <p>On a : $Qv_b(t) = v_b(t) * Section_{Sortie}$</p> <p>→ $Qv_2(t) = Section_{Sortie} * \sqrt{\frac{2*(Pr_1(t) - Pr_0(t))}{\rho} + 2 * g * \frac{V_0(t)}{Section_{Stockage}}}$</p>
<p>Tableau 13 : Spécification de la dynamique du processus énergétique de transport</p>	

La spécification de ces processus énergétiques, de leurs dynamiques et des règles d'agencements permet d'envisager une spécification exécutable du procédé de la plate-forme CISPI (Annexe 5-5).

5.3.1.2. Construction d'un modèle multi-physique exécutable de l'interaction ciblée

Afin de spécifier le procédé de la plate-forme CISPI en un modèle exécutable permettant à la fois de représenter la structure et la dynamique du procédé, l'espace-solution d'ingénierie du procédé a retenu le langage Modelica (Modelica, 2012). Modelica est un langage textuel orienté-objet pour la modélisation structurale et comportementale de systèmes complexes et multidomains (Fritzson, et al., 2002) développé depuis 1996 par une large communauté et standardisé par l'association à but non lucratif : « Modelica

Partie 3 : Co-spécification exécutable de constituants de conduite du procédé du système CISPI

Association »⁵⁴. Il propose également une approche graphique de modélisation à l’aide de diagrammes de blocs affranchissant ainsi l’ingénieur de l’écriture fastidieuse des éléments de programmations sous-jacents.

D’un point de vue structurel, il permet la modélisation des systèmes par assemblage de composants. Ces composants sont définis par des signaux (logique ou analogique sans nécessairement avoir une signification physique) et par des ports d’énergie caractérisé par des couples de variables généralisées (effort, flux) selon le tétraèdre de Paynter. La connexion avec les autres composants à travers les ports d’énergie et de matière est réalisée par le biais de connecteurs. Les connexions sont régies par les lois de Kirchhoff généralisées (conservation de l’énergie) : la somme des valeurs des variables de flux qui aboutissent en un même point est nulle, et les variables qui ne sont pas des flux sont égales. D’un point de vue comportemental, chacun des composants est décrit mathématiquement par un ensemble d’équations différentielles, algébriques et/ou discrètes définissant leur comportement dynamique. Les modèles continus, discrets et hybrides sont supportés par ce langage. L’assemblage des composants selon les lois de la physique permet de garantir le comportement global du système. Le langage Modelica permet de réaliser à la fois une description causale et acausale des modèles. Un modèle causal est caractérisé par des connexions de type signaux unidirectionnels alors que le modèle acausal possède des ports énergétiques. La modélisation acausale présente des avantages par rapport à la modélisation causale (Gaaloul, 2012) car elle offre une description :

- « Plus naturelle : cette description est proche de la réalité car les connexions y représentent un transit des variables énergétiques (efforts, flux) entre les modèles ».
- Plus flexible : l’introduction d’un nouveau modèle ne nécessite pas le ré-ordonnement manuel des équations du système pour établir la nouvelle causalité
- Plus automatique : la causalité de chaque modèle n’est plus traitée au préalable par transformation sous forme d’une représentation d’état. Il suffit de décrire le modèle à travers des équations différentielles algébriques et la causalité du système sera traitée dans sa globalité par le compilateur ».

Le fait que le langage repose sur le paradigme de programmation orientée objet, présente un intérêt majeur de réutilisation plus aisée des composants du système grâce aux concepts d’héritage et de polymorphisme. De nouveaux modèles peuvent être ainsi créés par extension des modèles existants. Cela est intéressant pour la création de nombreuses bibliothèques de modèles réutilisables de domaines variés (La bibliothèque standard Modelica couvre plusieurs domaines de la physique : mécanique, électrique, thermique, hydraulique ... (Modelica, 2008), en Physiologie (Mateják, et al., 2014), en système à événements discrets (Otter, Årzén, & Dressler, 2005), système d’air conditionné , de ventilation et de chauffage (Wetter, 2010), en automobile (Andreasson, 2003),.....). A notre connaissance, la majorité des bibliothèques Modelica permettent la modélisation des systèmes physique uniquement d’un point de vue logique. Bien que les bibliothèques « Bond Graph » (Cellier & Nebot, 2005) permettent de modéliser les procédés physiques à un niveau fonctionnel, cette représentation ne nous apparaît pas comme la plus adéquate pour la structuration du procédé en processus. De plus, la notation « Bond graph » ne facilite pas la traduction en langage SysML ainsi que le partage de **connaissances** entre l’ingénieur du procédé et l’ingénieur système. Ces raisons nous ont motivées à créer une nouvelle bibliothèque Modelica permettant la représentation des procédés physiques à un niveau fonctionnel selon les processus énergétiques Accumulation, Transport et Conversion tels que définis précédemment (Cf. Annexe 5-6).

⁵⁴ <https://www.modelica.org/>

Partie 3 : Co-spécification exécutable de constituants de conduite du procédé du système CISPI

Ainsi en raffinant le modèle du procédé de la plate-forme CISPI (Figure 77), l'**espace-solution** d'ingénierie du procédé spécifie un modèle exécutable de ce dernier, selon un agencement de processus accumulation, transport et conversion décrits dans la bibliothèque Modelica (Figure 89). En ce sens, les actions de modulation de débit sont vues comme des processus de conversion, l'action de stockage comme un processus d'accumulation et les actions de transport comme des processus de transport. Cette **spécification** (S_{IPro}) modélisée avec l'outil Dymola permet à l'ingénieur du procédé de compiler le code Modelica pour générer un modèle exécutable du procédé. Le simulateur intégré à l'outil a pour tâche de résoudre le système d'équations à chaque pas temporel, simulant ainsi le comportement dynamique du procédé étudié.

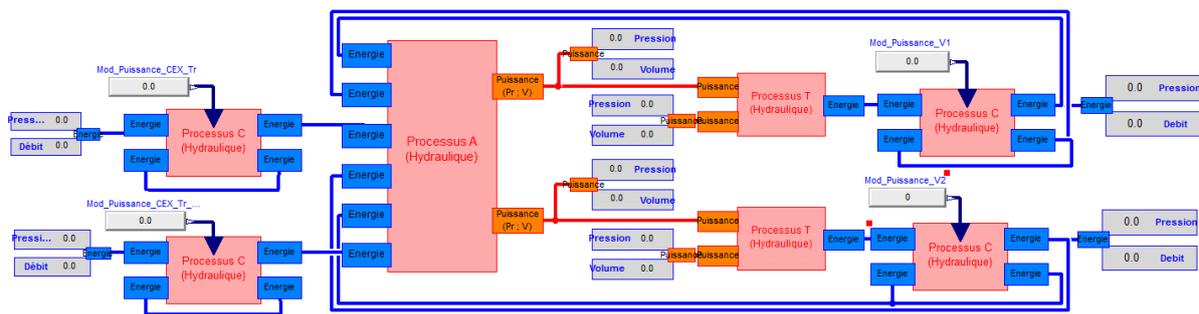


Figure 89 : Modèle orienté flux énergétique du procédé CISPI sous forme de diagramme de bloc en langage Modelica

La simulation du procédé, offre à l'ingénieur du procédé deux niveaux de vérification du modèle proposé. En effet, la compilation permet de vérifier la construction du modèle d'un point de vue syntaxique (*erreurs dans le code*) ainsi que sa complétude (*oublie de la déclaration d'une variable, d'une connexion...*). Une fois le modèle compilé, l'exécution de modèle offre un second niveau de vérification. Ainsi, en définissant différents scénarios de test l'**espace-solution** d'ingénierie du procédé est capable de vérifier que le procédé spécifié satisfait les exigences décrites par l'**espace-problème** d'ingénierie système. Par exemple, l'ingénieur du procédé est en mesure de vérifier que le dimensionnement de la **spécification** du procédé (S_{IPro}) de la plate-forme CISPI est adapté pour atteindre les performances décrit par l'exigence ($R_{IS1.7-0.1}$).

«Contrainte» Valeur_Debit_Alimentation_Secours
ID = RIS1.7-0.1
Le débit d'alimentation en eau de secours doit être de 30L/min
Puits:RhpString=Espace Solution : Ingénierie Procédé; Ingénierie Auto... Source:RhpString=Espace Problème : Ingénierie Système

Figure 90 : Exigence $R_{IS1.7-0.1}$: Performance requise du procédé relative au débit d'alimentation

Le scénario de test décrit par l'ingénieur du procédé consiste à vérifier par simulation que pour une situation initiale prescrite, le procédé spécifié est capable de fournir le débit d'alimentation attendu (30 L/min soit $0.0005 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$). Notons que pour ce scénario le débit d'alimentation est fonction de la hauteur du stockage de

Partie 3 : Co-spécification exécutable de constituants de conduite du procédé du système CISPI

5.4. Conclusion : Co-Spécification exécutable d'un modèle partiel constitutif de la partie physique ciblée

L'objectif de ce chapitre était de définir une interaction physique constitutive de la plate-forme CISPI dans notre environnement de co-spécification système en étant guidé dans un premier temps par la triade « **Function, Structure, Process** ». La co-spécification SysML résultante s'est avérée insuffisante pour rendre compte des couplages des phénomènes physiques en jeu pour l'interaction de modulation de débit d'eau visée.

Le raffinement de cette co-spécification en termes de triade « **Transformation, Input, Output** » avec l'ingénieur du procédé nous a amenés à considérer l'aspect multi-physique de la modélisation de cette interaction avant sa traduction SysML pour son intégration système.

Cette connaissance (K_{h_pro}) multi-physiques du procédé à conduire nous paraît essentielle pour construire un premier modèle total (M_{H_sysML}) du système étudié, notamment pour mieux satisfaire certaines exigences de sûreté ($R_{IS_pro_sysML}$) sensibles aux couplages des phénomènes physiques siège d'interactions critiques.

D'un point de vue conduite, le raffinement de cette co-spécification système se poursuit selon la triade « **Communication, Control, Command** » afin de maîtriser, d'un point de vue cybernétique, le comportement de l'interaction ciblée.

Partie 3 : Co-spécification exécutable de constituants de conduite du procédé du système CISPI

séquencement⁵⁵ d'actions, ainsi que l'élaboration de rapports (automatismes informationnels) à destination d'opérateurs ou d'autres fonctions de conduite. A l'échelle de notre cas d'utilisation, le modèle de commande de la plate-forme CISPI observe le générateur de vapeur pour définir la stratégie de conduite (*Alimentation_Voie1* ou *Alimentation_Voie2*) et les consignes de contrôle permettant de maintenir une capacité d'extraction de chaleur suffisante afin d'évacuer la puissance résiduelle du circuit primaire en situation incidentelle ou accidentelle.

L'**espace-problème** d'ingénierie-système est alors responsable de l'architecture des modèles de spécifications de contrôle et de commande selon le patron architectural CMMS, afin de prescrire à l'**espace-solution** d'ingénierie système une solution de la partie logique de la plate-forme CISPI.

6.2. Co-Spécification système d'un modèle exécutable constitutif d'une interaction de contrôle de modulation de débit d'eau

Il nous a semblé opportun d'intégrer, à ce niveau d'abstraction fonctionnelle, les travaux de (Fliess & Join, 2013) relatifs à la commande sans modèle (CSM) pour co-spécifier un comportement adaptatif d'une fonction de contrôle aux variations mesurables du processus à conduire. De par sa formulation, la CSM ne requiert pas d'identification préalable détaillée de la structure organique du sous-système opérant à contrôler. De plus elle fournit une information relative à la détection d'une dérive du comportement satisfaisant notre exigence architecturale CMMS/IAMS ($R_{ISAut1-1}$).

6.2.1. Spécification descriptive d'un modèle d'exigences constitutif d'une interaction de contrôle de modulation de débit d'eau

Afin de définir un algorithme de régulation en puissance d'alimentation en eau de secours, l'**espace-problème** d'ingénierie système décrit un ensemble d'exigences ($R_{IS_Aut-Cont}$) (Figure 101) à l'**espace-solution** d'ingénierie d'automatisation. Nous distinguons deux types d'exigences :

- fonctionnelles relatives à des contraintes de conception du modèle de contrôle ayant conduit à la sélection de la CSM comme solution
- opérationnelles relatives aux fonctions et performances requises par le modèle de contrôle, se concrétisant par un paramétrage de la CSM

⁵⁵ Les fonctions de séquencement (par exemple : fonction de lignage) consistent à exécuter, selon une séquence déterminée des actions élémentaires. Chacune d'elles peut être un automatisme informationnel, une commande de positionnement d'un actionneur, ou d'un groupe d'actionneurs, ou une autre séquence.

Partie 3 : Co-spécification exécutable de constituants de conduite du procédé du système CISPI

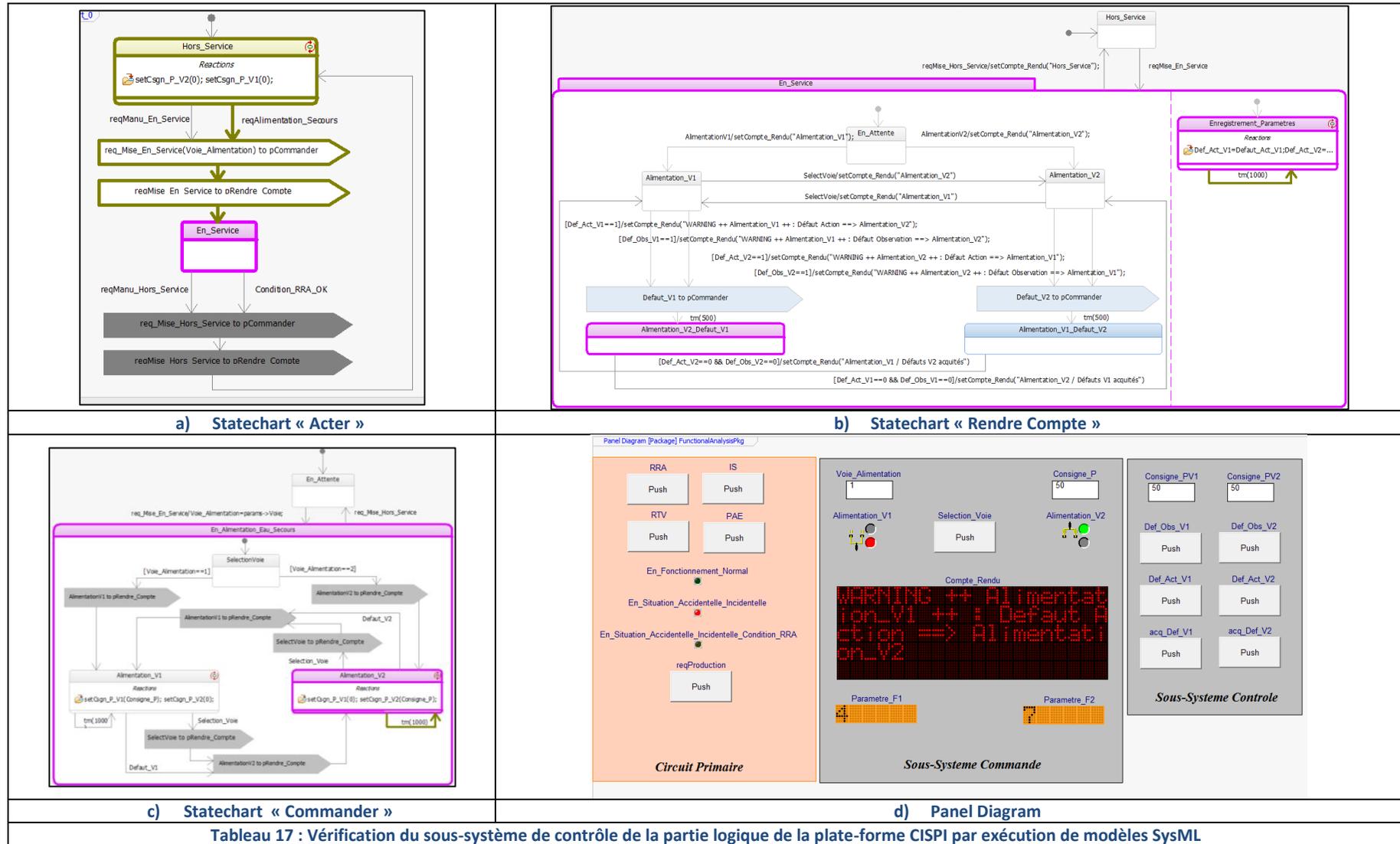


Tableau 17 : Vérification du sous-système de contrôle de la partie logique de la plate-forme CISPI par exécution de modèles SysML

Partie 4 : Co-spécification exécutable de constituants d'actionnement et de mesure du système de conduite CISPI

7.3. Co-intégration système d'un constituant d'interaction logico-physique de modulation de débit

La validation système d'un élément, modèle ou composant, constitutif d'un modèle global, requiert son intégration dans une situation réelle conformément à la définition formelle d'une spécification ou la reflétant au mieux en pratique par niveaux de maturité technologique⁶¹. En ce sens, nous présentons dans le prochain paragraphe, la validation de la spécification (S_{FAI}) du constituant d'actionnement intelligent immergé dans un premier temps dans un environnement simulé puis dans l'environnement réaliste que constitue la plate-forme CISPI. Dans le second paragraphe, nous détaillons la réalisation du constituant d'actionnement intelligent en tant qu'agent de conduite intégré au SIAC de la plate-forme CISPI.

7.3.1. Intégration d'un modèle constitutif de l'interaction ciblée

Validation du modèle dans un environnement simulé

A cette étape du scénario de co-spécification système, l'**espace-problème** d'ingénierie système est en charge de valider la spécification (S_{FAI}) du constituant d'actionnement intelligent de modulation de débit. Cette activité est réalisée par co-exécution de modèles (Figure 141) afin de s'assurer que le modèle du constituant d'actionnement intelligent immergé dans le modèle de son environnement opérationnel manifeste les phénomènes requis par les exigences systèmes ($R_{IS_FAI_SysML}$).

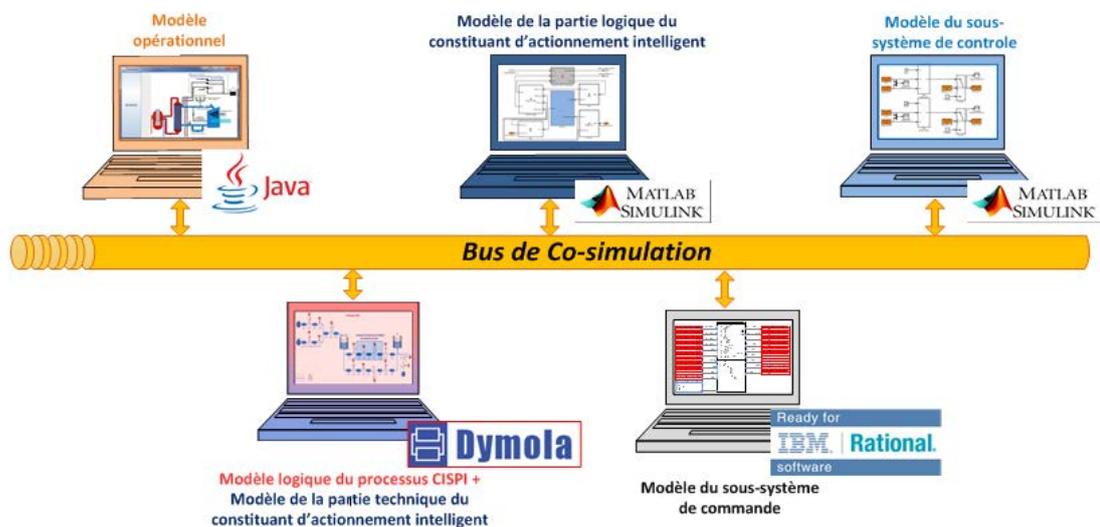


Figure 141 : Environnement de co-simulation système pour la validation de la spécification (S_{FAI}) du constituant d'actionnement intelligent de modulation de débit

Cela amène l'**espace-problème** d'ingénierie système à notifier à l'**espace-solution** d'ingénierie du procédé de raffiner son modèle du processus CISPI à un niveau fonctionnel (Cf. Chapitre 5) vers un modèle à un niveau logique, afin d'intégrer le modèle de la partie technique du composant d'actionnement intelligent dans l'environnement opérationnel de conduite. Notons que pour des raisons techniques liées à la co-simulation, les deux modèles (*environnement et constituant d'actionnement intelligent*) ont dû être intégrés au sein d'un même modèle (Figure 142).

⁶¹ Ces travaux se situent aux niveaux 4 et 5 d'une échelle TRL

Partie 4 : Co-spécification exécutable de constituants d'actionnement et de mesure intelligents du système CISPI

Validation du modèle d'actionnement intelligent dans un environnement représentatif de la réalité

Notre environnement de co-spécification système exécutable basée sur des modèles offre à l'ingénieur système des moyens techniques pour la validation de la spécification du constituant d'actionnement intelligent. Dans un processus d'ingénierie conduisant à l'intégration de ce constituant technique en tant que composant de la plate-forme CISPI, il est nécessaire d'éprouver la technologie dans des environnements de tests de plus en plus réalistes afin d'en évaluer son degré de maturité (selon l'échelle TRL (*Technology Readiness Level* (Mankins, 1995))). Cela nous a conduits à remplacer, dans notre environnement de co-simulation, le modèle⁶² du processus de la plate-forme CISPI (*Model in the Loop*) par le vrai processus physique en exploitation (*Hardware/Software in the Loop*) (Figure 146). Cette étape de validation nous permet alors d'atteindre le niveau 5 (*Validation du composant dans un environnement représentatif*) de l'échelle TRL.

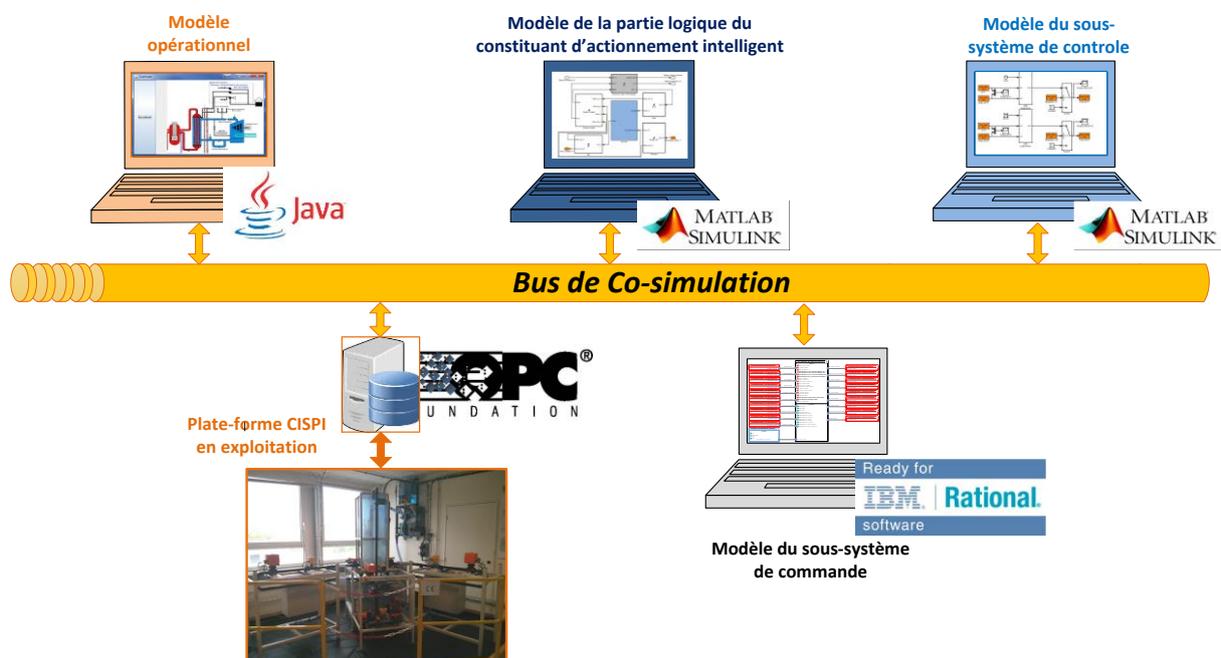


Figure 146 : Environnement de co-validation système pour la validation et l'évaluation du niveau de maturité de la spécification (S_{FAI}) du constituant d'actionnement intelligent de modulation de débit

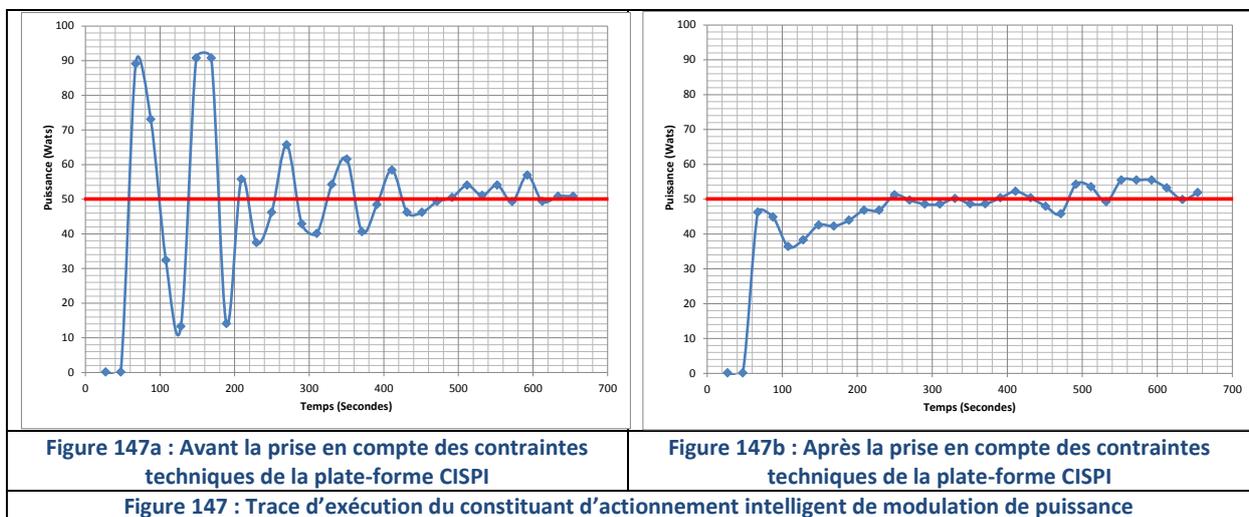
D'un point de vue technique pour effectuer le couplage entre le processus existant de la plate-forme CISPI avec le bus de co-simulation, il a été nécessaire de développer un module complémentaire se connectant au serveur OPC⁶³ de la plate-forme CISPI. Ce module a pour mission d'aller lire ou écrire les variables automatiques définies au niveau du serveur OPC (OLE for Process Control) et de diffuser ces données à travers le bus de co-simulation système. Ce module a été développé en langage Java en faisant appel à la librairie « Cosimate » permettant d'établir la connexion avec le bus de co-simulation retenu pour notre cas d'application (Cf. Annexe 7-5).

⁶² Un modèle est une représentation homomorphe du système étudié, qui en donne une vue partielle plus ou moins abstraite et permet d'en étudier certaines caractéristiques. En ce sens, le modèle de l'environnement du constituant d'actionnement intelligent représentant le processus CISPI, ne modélise pas l'ensemble des phénomènes émergents.

⁶³ Un serveur OPC fournit une méthode permettant à différents logiciels d'accéder aux données de dispositifs de contrôle de processus comme un automate programmable industriel

Partie 4 : Co-spécification exécutable de constituants d'actionnement et de mesure intelligents du système CISPI

En ce sens, l'**espace-problème** est en mesure d'éprouver le comportement du constituant d'actionnement intelligent de modulation de puissance en co-simulation, en couplant le modèle logique du constituant avec le sous-système technique (vanne + débitmètre) elle-même reliée à la plate-forme CISPI. Cette phase de test, a conduits à une nouvelle itération de spécification entre l'ingénieur système et le fournisseur d'actionnement intelligent. En effet, le modèle du processus de la plate-forme CISPI (Figure 142) ne prenant pas en compte les frottements de l'eau dans les canalisations ainsi que le temps de réponse d'ouverture et de fermeture de la vanne (*environ cinq secondes pour l'ouverture complète*), le paramétrage de la fonction de contrôle composant le constituant d'actionnement intelligent n'était pas optimisée (Figure 147a). Cette nouvelle itération a donc permis de prendre en compte ces contraintes techniques en raffinant la spécification (S_{FAI}) du constituant d'actionnement intelligent afin de satisfaire les exigences systèmes de performances (R_{IS_FAI1} , R_{IS_FAI2} , R_{IS_FAI3}) (Figure 147b).



7.3.2. Intégration d'un composant constitutif de l'interaction ciblée

Cette nouvelle itération de spécification, entre l'**espace-problème** d'ingénierie système et l'**espace-solution** fournisseur d'actionneur intelligent, a pour objectif de faire évoluer la maturité du constituant technique d'actionnement au niveau 6 (*Démonstration d'un prototype dans un environnement représentatif*) de l'échelle TRL. Ainsi, en se basant sur les différentes exigences systèmes, ainsi que les précédents modèles de spécification, le fournisseur réalise un prototype du constituant d'actionnement intelligent de modulation de puissance. Ce prototype s'intégrant au SIAC est immergé dans l'environnement opérationnel de conduite de la plate-forme CISPI afin de s'assurer qu'il manifeste les événements requis par l'environnement.

Notons que les exigences (Figure 132) :

- ($R_{FAI6.1}$): « Le débitmètre « FI433 » de la plate-forme CISPI de marque « GEORG FISHER +GF+ » et de type « Signet 8850-1 » doit être utilisé en tant que composant du constituant d'actionnement intelligent »
- ($R_{FAI6.2}$): « L'électrovanne « 431VM » de la plate-forme CISPI de marque « GEORG FISHER +GF+ » et de type « EA11 » doit être utilisée en tant que composant du constituant d'actionnement intelligent »

Partie 4 : Co-spécification exécutable de constituants d'actionnement et de mesure intelligente du système CISPI

prescrivent comment doit être réalisée la partie technique du constituant d'actionnement intelligent. En ce sens, nous nous focalisons sur la réalisation de la partie logique du constituant, contraint par l'exigence R_{FAIS} : « *Le constituant d'actionnement intelligent doit être réalisé à l'aide de la bibliothèque JADE SHARP Add On* ». En effet, le SIAC implémenté sur la plate-forme CISPI a été développé durant les travaux de thèse de (Dobre, 2010) en se basant sur la plate-forme multi-agents JADE⁶⁴ (Java Development Framework Agent) (Bellifemine, Poggi, & Rimassa, 1999). En d'autres termes, le FAI doit réaliser un prototype d'OLT (Objet Logique Technique) en tant qu'agent JADE du SIAC et reflétant le comportement des OMTs (Objets Matériels Techniques) correspondant au débitmètre « FI433 » et à l'électrovanne « 431VM » de la plate-forme CISPI.

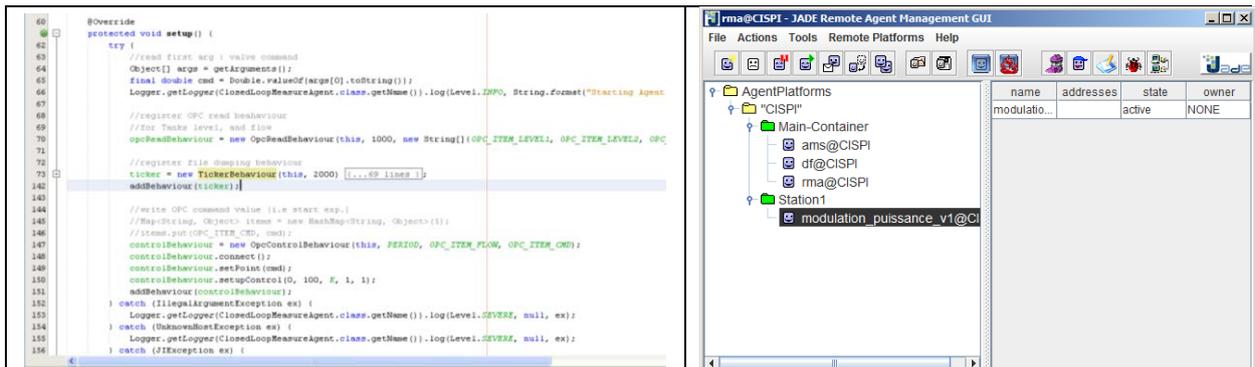


Figure 148a : Code source de l'agent de modulation de puissance

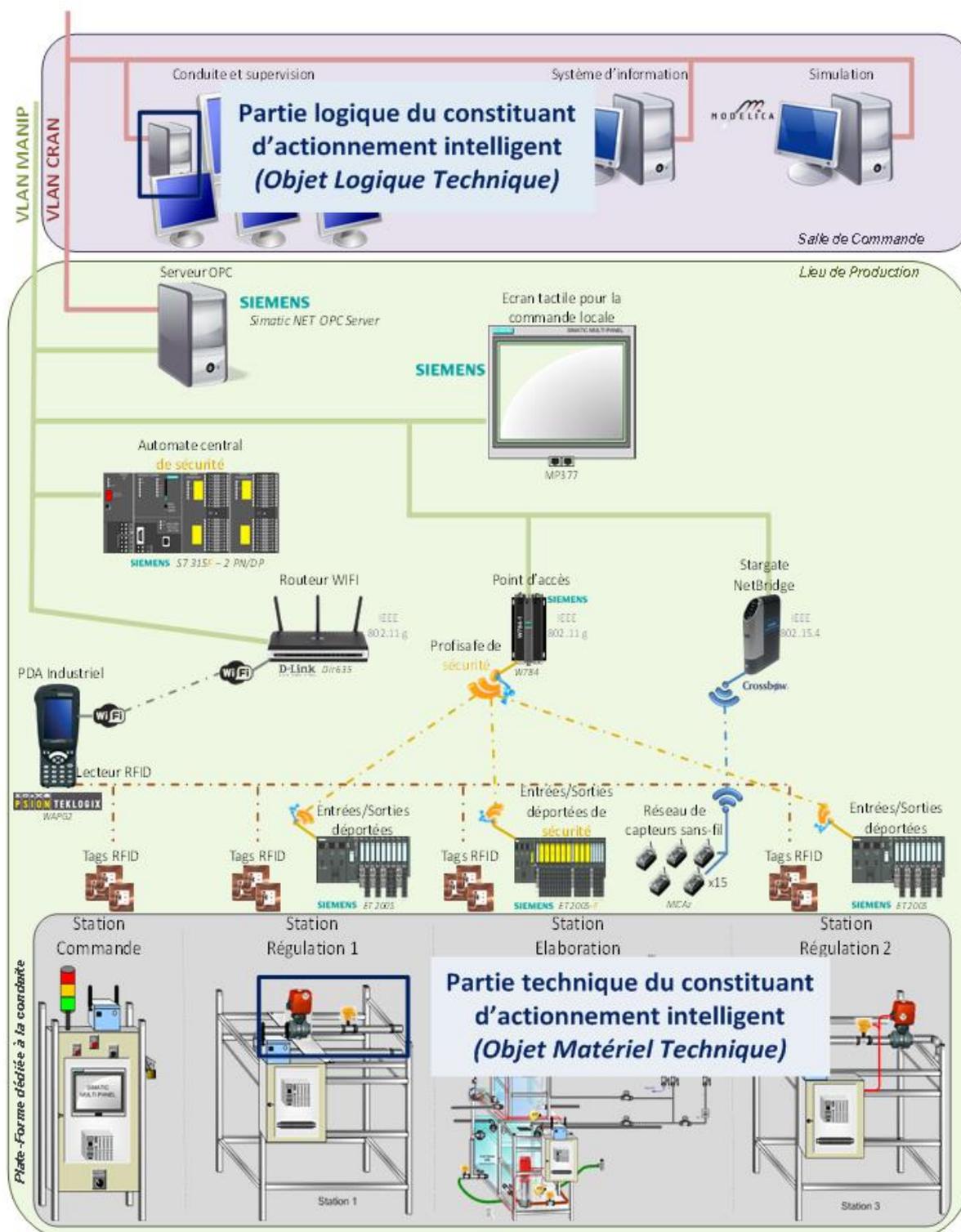
Figure 148b : Terminal d'exécution de l'agent de modulation de puissance

Figure 148 : Réalisation de la partie logique du constituant d'actionnement intelligent en tant qu'agent de la plate-forme JADE implémentant le SIAC

Une fois le prototype du composant d'actionnement intelligent de modulation de puissance réalisé (Figure 148), l'ingénieur système procède à son intégration au niveau de la plate-forme CISPI, afin de fournir la fonction de modulation de puissance d'alimentation en eau de secours requise par l'environnement. Ainsi la partie logique du constituant (*Agent de contrôle*) est implémentée au niveau de la plate-forme multi-agent JADE s'exécutant sur le poste de « **Conduite et de Supervision** » de la plate-forme CISPI. Quant à la partie technique, le FAI réutilise l'actionneur (*électrovanne « 431VM »*) et le capteur (*débitmètre « FI433 »*) de la station 1 de la plate-forme CISPI (Figure 149). Le déroulement des différents scénarios de tests permet ainsi à l'**espace-problème d'ingénierie**-système d'évaluer la maturité du constituant d'actionnement intelligent dans un environnement représentatif d'une situation de conduite.

⁶⁴ JADE est un cadre logiciel mise en œuvre dans le langage JAVA, pour simplifier la mise en œuvre de système multi-agents à travers un middleware simplifiée qui est conforme aux spécifications du FIPA (Foundation for Intelligent Physical Agents) et à travers un ensemble d'outils graphiques qui prennent en charge les phases de débogage et de déploiement. (<http://jade.tilab.com/>)

Partie 4 : Co-spécification exécutable de constituants d'actionnement et de mesureage intelligents du système CISPI



Partie 4 : Co-spécification exécutable de constituants d'actionnement et de mesurage intelligents du système CISPI

7.4. Conclusion : Co-spécification exécutable d'un modèle partiel constitutif de la partie d'« actionnement intelligent » ciblée

L'objectif de ce chapitre était de spécifier un élément sous forme de modèles puis de composants, qui soient constitutifs d'une interaction logico-physique du système CISPI en se limitant à une fonction de modulation de puissance d'alimentation en eau de secours. Ce constituant technique d'actionnement intelligent a été co-spécifié entre l'**espace-problème** d'ingénierie système et l'**espace-solution** FAI, nécessitant également l'intervention de l'**espace-solution** d'ingénierie du procédé pour raffiner le modèle du processus CISPI. Cette spécification est le résultat du raffinement d'une interaction logico-physique selon une interprétation du patron architectural CMMS-IAMS ayant conduit à la définition d'un agent de conduite s'intégrant au SIAC de la plate-forme CISPI. Au cours de cette définition, nous avons montré l'intérêt de la CSM pour définir rapidement et sans connaissances du processus à conduire le sous-système logique du constituant d'actionnement intelligent.

Les technologies numériques existantes en termes de co-simulation nous ont permis de valider et d'évaluer le degré de maturité de ce constituant d'actionnement intelligent immergé dans des environnements de plus en plus réalistes, pour atteindre le niveau 6 de l'échelle TRL à travers la réalisation d'un prototype.

De la même manière que nous venons de co-spécifier un constituant technique d'actionnement intelligent, nous nous focalisons dans le prochain chapitre sur un constituant physiologique de détection sonore constitutive de l'interaction logico-physiologique étudiée.

Partie 4 : Co-spécification exécutable de constituants d'actionnement et de mesure intelligents du système CISPI

8. Chapitre 8 : Co-spécification exécutable d'un constituant physiologique de mesure du système de conduite CISPI

8.1. Introduction : Partie « mesure intelligent » du système de conduite CISPI

A cette étape de notre scénario de co-spécification système, notre intérêt se porte sur le raffinement d'une fonction MI opérée par un agent humain en tant qu'observateur d'une situation de conduite. Notre interprétation de cette fonction MI s'appuie principalement sur des travaux relatifs à la « spécification d'exigences physico-physiologiques en ingénierie d'un système support de maintenance aéronautique » auxquels nous avons contribué en tant que spécialiste de modélisation-simulation (Lieber, Dupont, Bouffaron, & Morel, 2013) dans le cadre du doctorat de (Lieber, 2013). Plus précisément, notre étude se focalise sur le comportement de l'interaction (Figure 150) entre les parties logique et physiologique du système de conduite en co-spécification afin de s'assurer au plus tôt que les phénomènes abordés soient bien détectés pour être bien perçus (Hartson, 2003).

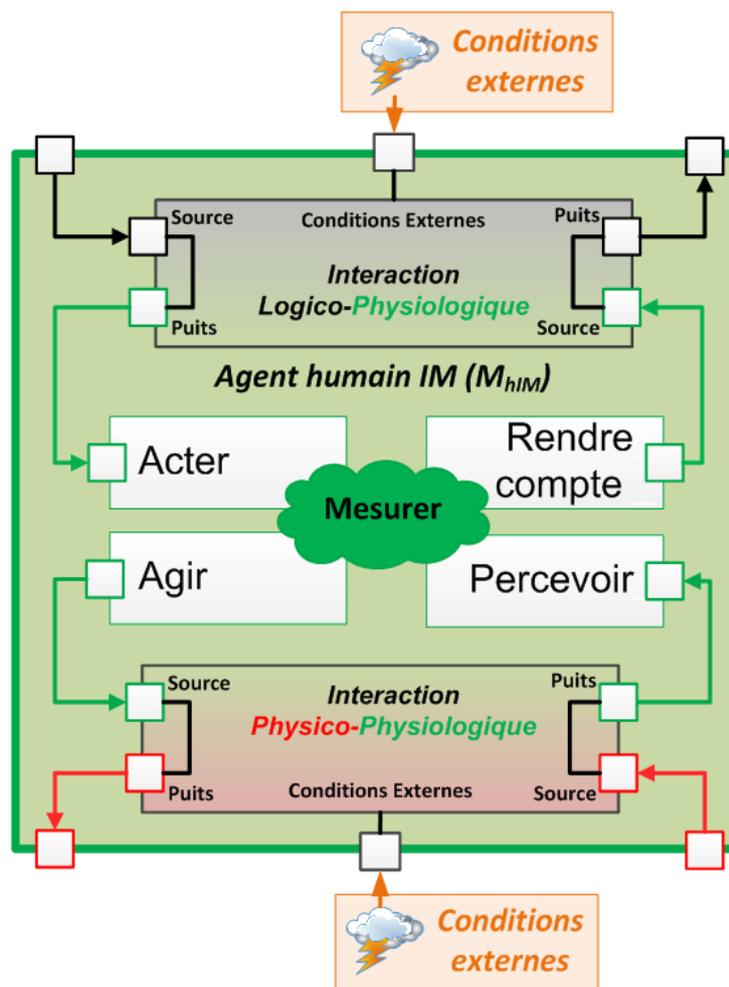


Figure 150 : Patron architectural de Mesurage Intelligent par un Agent Humain

De façon complémentaire, cette « bonne détection » pour « bien percevoir » afin de « bien agir » s'applique aussi à l'interaction entre les parties physique et physiologique du système de conduite. L'ensemble de ces

Partie 4 : Co-spécification exécutable de constituants d'actionnement et de mesurage intelligents du système CISPI

activités contribue à la construction du schéma mental de conduite dont l'importance a été soulignée par (Galara, 2011) :

- **Acter** : Au cours de la conduite, les opérateurs reçoivent des objectifs pouvant provenir d'autres opérateurs en salle de commande ou sur le terrain, d'alarmes, de procédures, d'écrans de contrôle... Compte tenu de ces objectifs, l'opérateur se réfère à son schéma mental de conduite, pour supprimer les ambiguïtés de transmission (*fonctionnelles, temporelles, ordre contre ordres*) et s'assurer de leurs cohérences vis à vis des contraintes de conduite. Un certain nombre de ces objectifs requièrent que l'opérateur observe son environnement afin de percevoir la situation globale de conduite. Ceci est particulièrement vrai lors des rondes d'observations effectuées par les agents de terrain.
- **Percevoir** : A partir des objectifs, l'opérateur observe la situation globale de conduite pour se construire une représentation de l'état dans lequel se situe l'installation, un équipement, le procédé,... Pour élaborer ces schémas mentaux, les opérateurs sont amenés à prendre en compte des mesures issues de capteurs ou des perceptions sensorielles (*ouïe, odorat, vue, toucher, goût*) de leur environnement de travail.
- **Agir** : La perception est dépendante de l'action. Plus précisément le concept d'affordance, issu de la théorie écologique de la perception de (Gibson, 1977), souligne le caractère actif de la perception, c'est-à-dire orientée en fonction d'un but à atteindre. Ainsi, pour se construire une représentation du réel, les opérateurs se déplacent dans leur environnement, balayent du regard l'espace, orientent leurs sens en direction des sources sonores, touchent les objets,....
- **Rendre compte** : En se basant sur son schéma mental et sur les objectifs, l'opérateur restitue sa perception de la situation réelle de l'installation, des équipements ou du procédé. Notons que cette restitution reflète le réel selon le point de vue de l'opérateur. Il faut donc une communication pertinente entre les opérateurs, justifiant numériquement le PLM, pour s'assurer que les équipements, les sources d'informations, l'état présumé et les niveaux de compréhension soient cohérents pour que la situation soit comprise de la même manière.
- **Mesurer** : Cette activité en interaction avec les 4 précédentes concerne les processus cognitifs mis en œuvre par un agent humain en tant qu'observateur (mesureur). Nous interprétons cette activité comme une situation d'activité lente au sens de (Berthoz, 1997) laissant une place centrale au cerveau qui reçoit (cortex auditif, visuel ...), traite, analyse et synthétise les informations lui permettant de simuler l'action et de prédire ses conséquences avant de commander l'action. Ces simulations et prédictions reposent ainsi sur un ensemble de règles d'interprétations, issues de l'apprentissage et de la mémorisation des actions passées.

En ce sens, nous avons exploré au cours de nos travaux de thèse un ensemble d'interactions élémentaires de perceptions sensorielles entre un agent humain de conduite et son environnement de travail :

- Interaction tactile :
 - Perception des vibrations permettant de caractériser l'écoulement de l'eau dans des conduites, le bon fonctionnement d'un moteur en rotation,
 - Perception thermique (Schmidt, 1999): En cas d'obstruction d'une conduite à la sortie d'une pompe, la pression du liquide refoulé par cette dernière va augmenter et par conséquent la température du liquide aussi. La perception d'une différence de température par rapport aux conditions nominales, peut ainsi révéler une dégradation, ou une défaillance des équipements.
- Interaction visuelle : Perception de la couleur et du clignotement des boutons TPL (Turner-Pousser Lumineux) représentant l'état de fonctionnement d'un équipement (Prouillac, Lerat, & Janior)

Partie 4 : Co-spécification exécutable de constituants d'actionnement et de mesurage intelligents du système CISPI

- Interaction sonore :
 - Perception de sifflements lors des opérations d'événages en phase de maintenance
 - Perception des bruits des pompes pouvant caractériser une dégradation de l'équipement (J. Morel, 1992)
 - Perception d'alarme pour alerter des situations incidentelles ou accidentelles
 - Perception de situation normale de conduite : Par exemple, en continuité du chapitre 7, nous aurions pu nous intéresser au bruit de l'écoulement de l'eau à travers une conduite en tant que retour d'observation de l'action d'ouverture ou de fermeture de la vanne pouvant être contrôlée à distance.

Dans la suite de ce chapitre, nous nous sommes focalisés sur l'une des interactions sonores. En effet, les agents humains en situation d'exploitation sont amenés à percevoir des sons susceptibles de déclencher des procédures apprises. Il peut s'agir d'une alarme sonore, d'un bruit caractéristique d'un quelconque dysfonctionnement ou tout simplement d'une signature sonore de bon fonctionnement.

8.2. Co-spécification système d'un modèle d'interaction physico-physiologique de détection sonore

Pour des raisons opérationnelles de démonstration, et en tenant compte des données disponibles d'un point de vue biologique, nous nous sommes intéressés à une interaction -physico-physiologique de détection d'une alarme sonore entre un constituant technique « **Source** » et un constituant humain⁶⁵ « **Puits** » (Figure 151). Nous dépassons la simple étude d'une interface technico-humaine pour spécifier le comportement d'un bloc « interaction » sous la forme d'un modèle exécutable dans notre processus global de co-spécification système de la plate-forme CISPI. L'objectif de cette étude est de spécifier les propriétés physiques requises par le constituant technique « **Source** » afin de stimuler correctement le constituant humain « **Puits** » au regard de ses capacités physiologiques. Bien que cette étude ne soit pas suffisante pour prendre en compte l'ensemble des facteurs humains, elle définit cependant un premier niveau d'exigences dans la définition d'un modèle exécutable constitutif d'une interaction que nous qualifions de physico-physiologique en raison de la nature des milieux traversés.

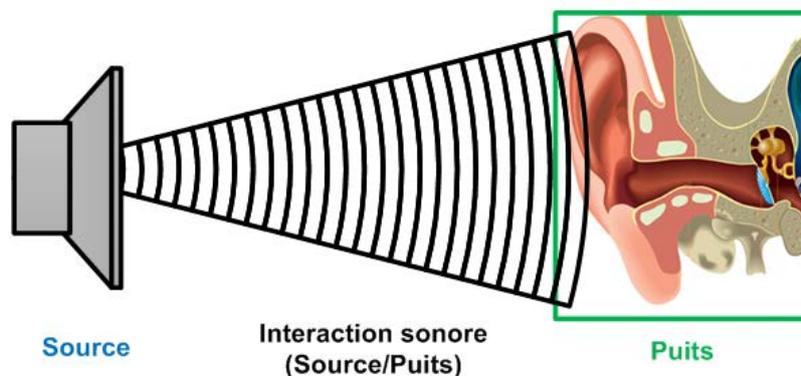


Figure 151 : Interaction logico-physiologique de détection sonore

⁶⁵ Nous substituons « constituant » à « agent » pour marquer que ces éléments et leurs modèles sont constitutifs du système CISPI et de son modèle global

Partie 4 : Co-spécification exécutable de constituants d'actionnement et de mesurage intelligents du système CISPI

Nous présentons dans la suite de ce chapitre la spécification descriptive d'un modèle d'exigences de cette interaction par l'**espace-problème** d'ingénierie système requérant d'un **espace-solution** d'ingénierie physiologique un ensemble de connaissances (K_{Iphy}). La spécification prescriptive résultante est dérivée de la construction d'un modèle exécutable de la perception sonore chez l'humain, afin de déterminer les conditions nécessaires, mais non suffisantes, au bon stimulus des activités perceptives de conduite. Ce modèle exécutable est ainsi constitutif de cette interaction dans l'ensemble des modèles constituant notre modèle global du système CISPI.

8.2.1. Spécification descriptive d'un modèle d'exigences constitutif d'une interaction sensorielle de détection sonore

8.2.1.1. Éléments de connaissances d'une interaction sensorielle

En tant qu'ingénieur système, cette interaction physico-physiologique nous pose le problème de savoir comment fonctionnaliser un objet technique « Source » pour tenir compte des contraintes physiologiques de l'humain. Cette interprétation se base sur un ensemble de travaux (G. Morel, et al., 2013) situant le cadre théorique des affordances (Gibson, 1977), (Gibson, 2014) en tant que **connaissance** du domaine d'ingénierie système, et soulignant l'importance des degrés d'affordance que doivent porter les constituants techniques pour interagir avec les constituants humains (Cf. Annexe 8-1 - Figure 225) .

Plus précisément une affordance fonctionnelle requiert une condition nécessaire pour l'affordance sensorielle relative à la quantité physique requise pour bien stimuler « la perception » (Tableau 18) (Hartson, 2003). En interprétant ces travaux, nous pouvons reformuler le problème à résoudre selon : « comment bien fonctionnaliser le constituant technique pour qu'il afforde le bon signal au constituant humain ? »

Type d'affordance	Description	Exemple
Cognitive	Caractéristique de conception qui aide un utilisateur à savoir quelque chose	Le timbre caractéristique d'une alarme sonore permet de prévenir l'opérateur d'une situation incidentelle ou accidentelle.
Physique	Caractéristique de conception qui aide un utilisateur à effectuer une action	Le rythme de l'alarme est le paramètre le plus pertinent pour décrire différentes catégories d'urgence allant de l'alerte à la confirmation d'un évènement (Suied, 2007)
Sensorielle	Caractéristique de conception qui aide un utilisateur à percevoir quelque chose	La puissance sonore d'une alarme permet de caractériser les conditions nécessaires mais non suffisantes de perception de l'alarme (Cf. suite du chapitre)
Fonctionnelle	Caractéristique de conception qui aide un utilisateur à accomplir une procédure de conduite	En situation incidentelle, l'alarme sonore est déclenchée pour alerter l'opérateur de conduite (<i>qui va suivre une procédure de conduite pour rétablir le système dans un état sûr de fonctionnement</i>).

Tableau 18 : Types d'affordances pour une interaction physico-physiologique de détection sonore. Adapté de (Hartson, 2003)

Partie 4 : Co-spécification exécutable de constituants d'actionnement et de mesurage intelligents du système CISPI

8.2.1.2. Définition des exigences de l'interaction sensorielle ciblée

A cette étape du scénario de co-spécification système, le domaine d'ingénierie système étudie la situation globale de détection d'une alarme sonore par un agent humain. En ce sens, il se pose le problème de caractériser l'affordance sensorielle d'interaction sonore selon des critères mesurables en tant que conditions nécessaires mais non suffisantes pour l'affordance fonctionnelle. L'**espace-solution** d'ingénierie système n'ayant pas les connaissances pour spécifier ce type d'interaction formalise alors ce problème ($P_{IS_Phy_SysML}$) dans son **espace-problème** sous la forme d'un diagramme d'exigences ($R_{IS_Phy_SysML}$) (Figure 101). Au cours d'une première itération de spécification, ces exigences systèmes sont notifiées à l'**espace-solution** d'ingénierie physiologique qui est alors en charge de prescrire une solution (S_{IPhy_SysML}) dérivée d'un modèle exécutable (M_{hIM}) de l'interaction étudiée.

De façon plus détaillée, les exigences décrites à l'**espace-solution** d'ingénierie physiologique $\{R_{IS_Phy1.1}, R_{IS_Phy1.2}\}$ sont raffinées à partir d'une exigence système ($R_{IS_Phy1.1}$) selon un ensemble de connaissances $\{K_{IO3}, K_{IO4.1}, K_{IO4.2}\}$ provenant de l'espace solution d'ingénierie opérationnelle. Cette exigence ($R_{IS_Phy1.1}$) est une exigence physiologique de conduite décrivant l'interaction de perception sonore entre la plate-forme CISPI et les opérateurs de conduite en cas de situation accidentelle : « *débordement de la cuve de stockage* ». Notons également qu'une exigence de contrôle ($R_{IS_Aut-Cont2}$) est dérivée de cette exigence ($R_{IS_Phy1.1}$) afin de déterminer les conditions de déclenchement de l'alarme sonore.

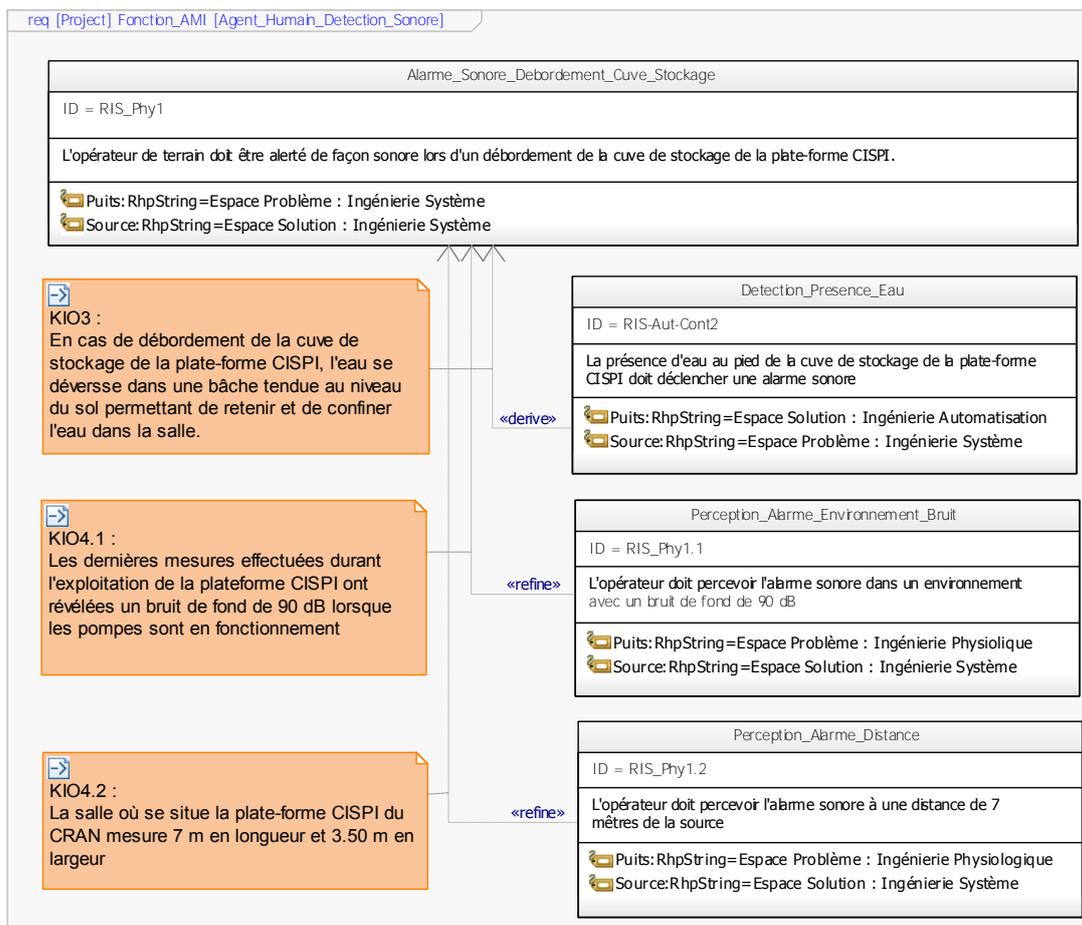


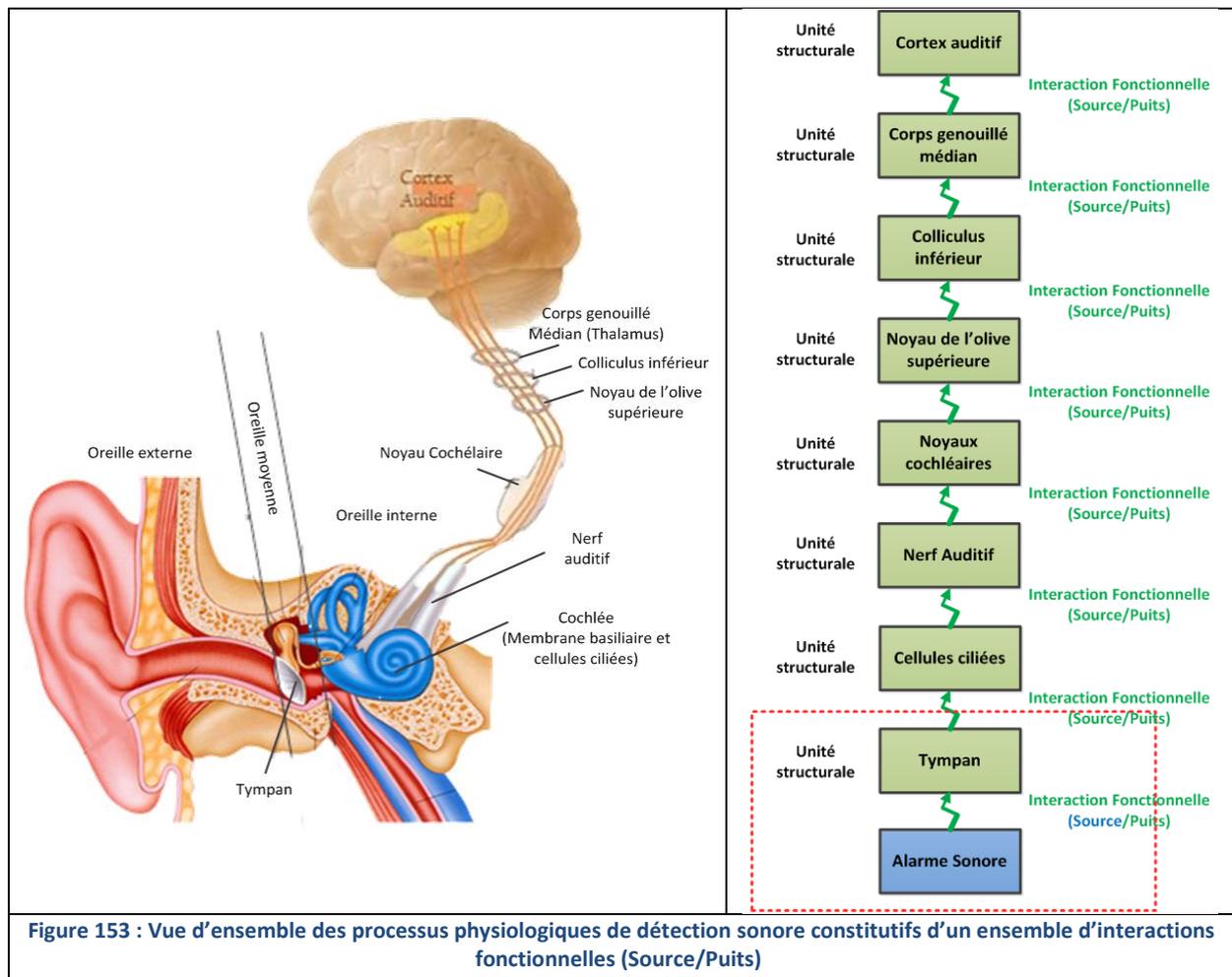
Figure 152 : Modèle d'exigences système ($R_{IS_Phy_SysML}$) relatives au constituant sensoriel de mesurage intelligent

Partie 4 : Co-spécification exécutable de constituants d'actionnement et de mesurage intelligents du système CISPI

8.2.2. Spécification prescriptive d'un modèle d'exigences constitutif d'une interaction physiologique de détection sonore

8.2.2.1. Éléments de connaissances d'une interaction physiologique

Il a été montré dans (Lieber, 2013) qu'une condition nécessaire mais non suffisante d'affordance sensorielle est aussi relative à la quantité de données physiques transportées jusqu'au capteur sensoriel de l'humain afin de stimuler l'ouverture du potentiel d'action des processus physiologiques déclenchant à leur tour les processus cognitifs de prises de décision et d'action (Cf. Annexe 8-1 - Figure 226). L'explication de la propagation de cette quantité physique parmi différentes unités structurales⁶⁶ biologiques s'appuie sur la théorie mathématique de la physiologie intégrative (MTIP⁶⁷) définie par (Chauvet, 1993), (Chauvet, 1995). Cette théorie, constituant une partie de la connaissance (K_{IPHY}) de l'espace-solution d'ingénierie physiologique, s'appuie sur une mathématisation ayant pour objectif la construction de modèles exécutables décrivant les processus physiologiques comme une combinaison d'« interactions fonctionnelles » non symétriques et non locales entre unités structurales situés dans un espace hiérarchique (Figure 153).



⁶⁶ Unité structurale = Structure physique, agencement de molécules dans l'espace physique, par exemple un neurone localisé à un endroit du cerveau

⁶⁷ <http://www.admiroutes.asso.fr/gilbertchauvet/>

Partie 4 : Co-spécification exécutable de constituants d'actionnement et de mesurage intelligents du système CISPI

*Les ondes sonores qui parviennent à l'oreille font vibrer le tympan. Ces vibrations produisent dans le liquide de l'oreille interne des ondes de très faibles amplitudes qui stimulent des cellules ciliées situées à la surface de la membrane basilaire. Ces cellules ciliées constituent les récepteurs auditifs primaires (analogues au photorécepteur de l'œil). Les oscillations de la membrane basilaire provoquent l'émission de potentiels d'action par les cellules ciliées qui activent les fibres du nerf auditif innervant les noyaux cochléaires du tronc cérébral. Les fibres ascendantes gagnent le cortex auditif après avoir fait relais dans le colliculus inférieur et dans le corps genouillé médian du thalamus. D'après (Gazzaniga, Ivry, & Mangun, 2000) et (Bear, Paradiso, Connors, & Neuroscience, 1996). **Nos travaux se focalisent sur l'interaction fonctionnelle qui stimule de l'extérieur le nerf auditif.***

Afin de faciliter la compréhension de la construction du modèle de détection sonore par l'**espace-solution** d'ingénierie physiologique, nous détaillons dans la suite de ce paragraphe le fondement théorique de la MTIP essentiel pour nos travaux qu'est l'« **interaction fonctionnelle** ». La MTIP est une approche de physiologie théorique qui envisage l'organisme vivant dans sa **globalité**⁶⁸, c'est-à-dire comme faisant partie d'un système général intégré. Sa mathématisation a pour objet de définir l'intégration des mécanismes biologiques en interaction afin de décrire le fonctionnement du système humain à partir de ces sous-systèmes, tout en se référant aux lois de la physique. En effet, pour Chauvet, l'organisme, c'est à dire l'ensemble des processus physiologiques qui prennent place entre les différentes structures biologiques, est un système hiérarchique continu et fini de structures ainsi qu'une combinaison d'interactions fonctionnelles entre ces structures (Cf. Annexe 8-1 - Figure 227).

Interaction Fonctionnelle

L'interaction fonctionnelle est considérée comme l'atome élémentaire d'un processus physiologique. Elle se définit comme « l'action d'une structure biologique sur une autre » par l'intermédiaire d'un support physique (pouvant être des ions, des molécules, des photons,...) permettant de diffuser ainsi des données d'une unité structurale source⁶⁹ vers une unité structurale puits⁷⁰ (Figure 154). Cette interaction présente plusieurs propriétés spécifiques :

- **Non-symétrie** : l'interaction fonctionnelle s'exerce d'une unité de structure source vers une autre unité de structure puits. Elle représente une action unidirectionnelle ; ainsi à un même niveau d'organisation, le signal ne rétroagira pas du puits vers la source. Dans notre cas d'étude, la source est l'alarme technique sonore
- **Causalité événementielle** : la relation de cause à effet est due à l'existence d'un événement ; c'est parce que cet événement a existé comme cause à un instant antérieur (**t**) que l'effet va exister à un instant (**t'**). C'est un effet non local, ou encore à distance. Dans notre cas, la détection sonore de l'alarme est la cause ou l'événement qui déclenche l'interaction fonctionnelle entre le cortex auditif et le cortex cognitif
- **Non-instantanéité** : la vitesse de transport d'une fonction élémentaire est finie. Dans notre cas, la stimulation de l'élément de connaissance par la détection sonore de l'alarme est de l'ordre de quelques millisecondes voire secondes.
- **Non-localité** : Une fonction élémentaire agit à distance et crée des couplages entre structures éloignées. Le produit échangé est transporté d'un endroit à un autre non voisin en se propageant au

⁶⁸ D'où notre intérêt pour construire un « Whole Model »

⁶⁹ Source : Unité structurale cause de l'interaction fonctionnelle

⁷⁰ Puits : Unité(s) structurale(s) qui reçoivent l'effet (ion ou molécules) émis par la source

Partie 4 : Co-spécification exécutable de constituants d'actionnement et de mesure intelligents du système CISPI

travers de discontinuités structurales⁷¹. Dans notre cas, nous limitons cette propagation à un flux uniquement de nature physique.

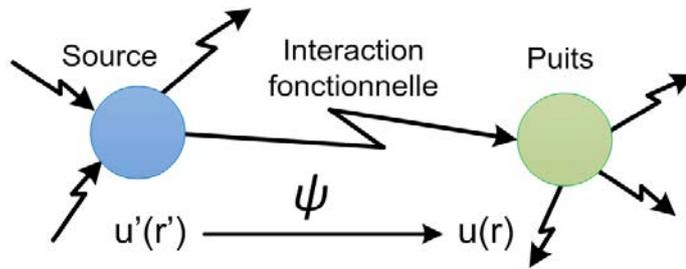


Figure 154 : Interaction Fonctionnelle ψ entre la source $u'(r')$, unité de structure à la position r' , et le puits $u(r)$, unité de structure à la position r . Puits et source peuvent devenir tour à tour source ou puits (Chauvet, 1995).

En ce sens, une interaction fonctionnelle traduit un mécanisme de passage d'un produit entre au moins deux unités structurales, par exemple le cortex auditif et le cortex cognitif. Ce mécanisme de passage est dépendant à la fois du temps et de l'espace. Il peut être représenté mathématiquement dans le cadre théorique de la MTIP par des opérateurs de champ non locaux appelés : S-Propagateur et notés Φ (Chauvet, 2002). De façon didactique, (Dupont, Lieber, Morel, Méry, & Bouffaron, 2012) proposent un diagramme de type « Thyristor » pour expliquer le comportement de l'interaction fonctionnelle, en combinant les travaux de la « physiologie intégrative » avec ceux de la « physiologie de la perception et de l'action (Berthoz, 2009) » afin de mettre en évidence l'importance d'une « bonne spécification » du flux physique « Stimulus-source » ($\psi^{(i)}(r^{(i)'})$).

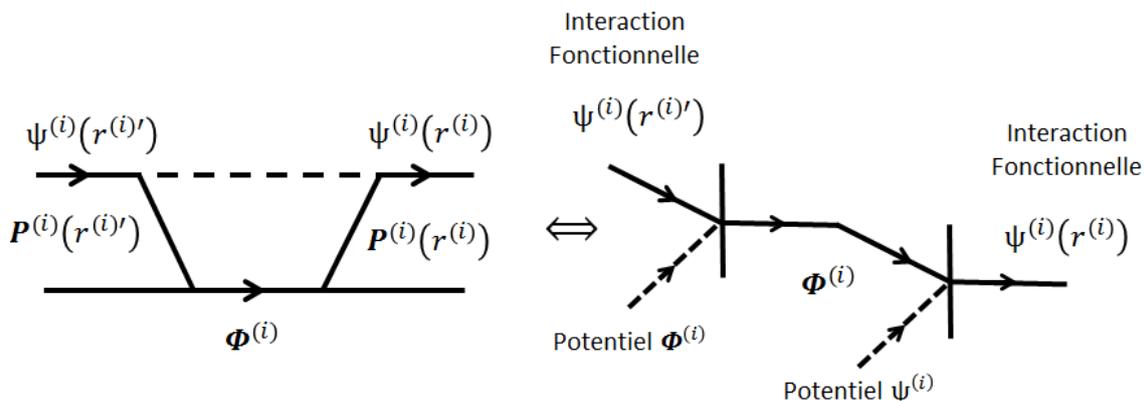


Figure 155 : Modèle explicatif de l'interaction fonctionnelle : Analogie entre la représentation de Chauvet et un schéma électrique montrant l'importance de la stimulation d'un certain potentiel d'action pour ouvrir les « portes » de propagation du flux d'interaction physico-physiologique (Lieber, et al., 2013)

De façon plus détaillée, une interaction fonctionnelle ψ située en r' stimule une interaction fonctionnelle Φ d'un niveau inférieur (premier thyristor) qui elle-même va stimuler une interaction fonctionnelle située en r du

⁷¹ Unité structurale qui est le siège d'un processus fonctionnel différent de celui existant dans les unités structurales au niveau supérieur. Les discontinuités structurales sont à l'origine de l'existence de l'organisation hiérarchique

Partie 4 : Co-spécification exécutable de constituants d'actionnement et de mesurage intelligents du système CISPI

même niveau supérieur, permettant ainsi d'assurer de r' à r le passage de ψ avec un certain délai dépendant de sa vitesse de propagation (second thyristor). Appliqué à notre exemple, ceci met en exergue que la propagation du produit physiologique jusqu'au cortex cognitif est contrainte par certaines conditions nécessaires telle la stimulation initiale liée au son de l'alarme (en amont du cortex auditif et de l'oreille). Dit autrement, il faut qu'une certaine quantité physique liée à la détection du son de l'alarme se propage pour stimuler une connaissance stockée chez l'humain, telle que celle matérialisée par les procédures de conduites en situation incidentelle ou accidentelle, permettant de rétablir l'installation dans un état sûr de fonctionnement.

Notons cependant que la construction de ces modèles exécutables dans le formalisme de la MTIP requiert un grand nombre de données relevant à la fois de l'anatomie (densité cellulaire par exemple) et de la physiologie (mécanismes biochimiques par exemple) qui, à l'heure actuelle ne sont pas disponibles faute d'expérimentations techniquement difficiles. Ces précédents travaux ont cependant permis de montrer que le facteur d'échelle (densité synaptique) requis pour la mise en œuvre de la MTIP en modélisation numérique n'était pas forcément nécessaire en regard de celui plus macroscopique exigé par la nature collaborative d'un processus d'ingénierie système. En ce sens, nous interprétons l'interaction physico-physiologique de détection sonore en tant qu'interaction physique, signifiant qu'un flux physique est propagé d'un constituant technique source vers un constituant physiologique puits tant que le milieu traversé ne nécessite pas une transmutation en flux biologique.

8.2.2.2. Définition des exigences de l'interaction physiologique ciblée

Lors de la modélisation de l'interaction de détection sonore, il est apparu opportun aux domaines de l'ingénierie système et de l'ingénierie physiologique de traiter la quantité physique transportée en puissance pour viser une ingénierie centrée système facilitant la prise en compte d'éléments d'ingénierie centrée humain par l'ingénierie courante centrée technique. En effet, les conditions physico-physiologiques de perception sensorielle exprimées en puissance assurent une meilleure intégration entre le monde de la physique (Cf. chapitre 5) et le monde de la physiologie. Cela amène le domaine d'ingénierie physiologique à spécifier les sons⁷² complexes (décomposables en une superposition de sons purs sinusoïdaux (bruit aléatoire)) à travers le concept d'onde de pression proportionnelle à la puissance acoustique. En ce sens, il est important de noter que la requête d'un modèle physiologique exécutable, qui soit constitutif de l'ensemble des modèles d'un seul et même système, a inféré une base différente de modélisation que celle qu'aurait mise en œuvre le spécialiste de façon isolée.

A cette étape du scénario de co-spécification, l'**espace-solution** d'ingénierie physiologique doit appliquer le patron architectural d'interaction fonctionnelle (Figure 154) pour étudier l'interaction de détection sonore selon trois constituants correspondant au constituant physiologique « puits », l'interaction fonctionnelle « source/puits » et le constituant technique « source » (Figure 165). Il convient alors de s'intéresser dans un premier temps au constituant « puits » pour définir la plage de perception auditive chez l'humain et délimiter ainsi dans un second temps les caractéristiques physiques du constituant technique « source » afin de garantir la « bonne » détection de l'alarme sonore.

⁷² Un son est une perturbation locale de pression qui se propage de proche en proche.

Partie 4 : Co-spécification exécutable de constituants d'actionnement et de mesurage intelligents du système CISPI

Constituant physiologique de détection sonore

Ce constituant « puits » délimite l'espace de bonne perception auditive en fonction de la fréquence du son appartenant à une fenêtre spectrale comprise entre 16 Hz (infra-sons) et 20 kHz (ultra-sons) et son intensité sonore (I_{sonore}) exprimée en décibel (dB) (Goldstein, 2009).

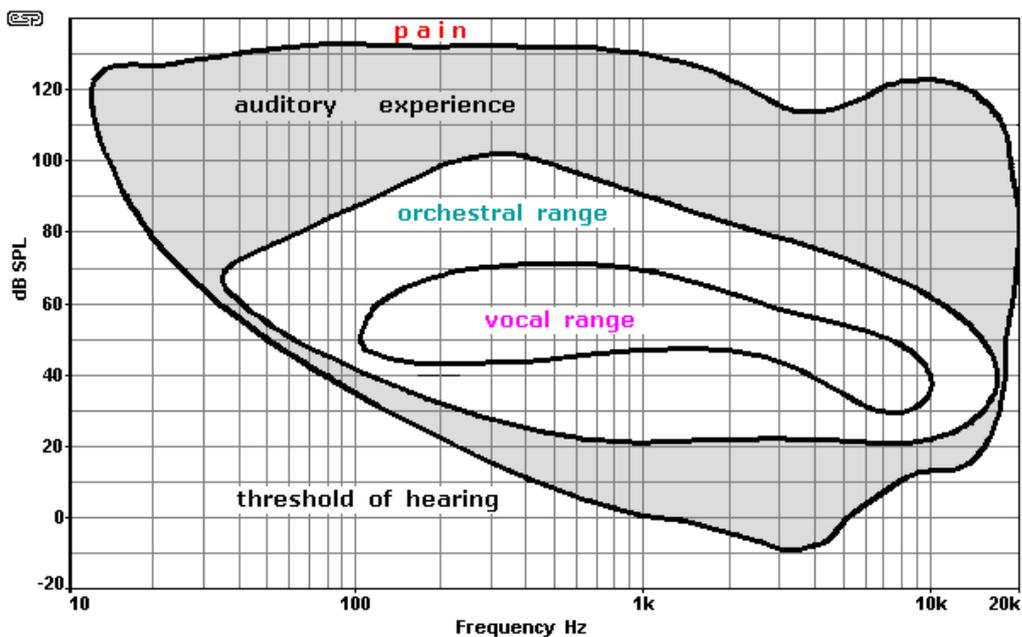


Figure 156 : Plages typiques du champ auditif humain ⁷³

A partir de cette connaissance, l'**espace-solution** d'ingénierie physiologique dérive une nouvelle exigence mesurable (I_{phy-H1}) introduisant l'intensité sonore (I_{sonore}) du signal exprimée en décibel selon les inégalités suivantes (Figure 157) :

«Requirement» Capacité_Physiologique_Humain
ID = RIPhy-1.1
L'onde de pression reçue au niveau du canal auditif (I_{sonore}) doit satisfaire par son intensité sonore résultante le champ auditif humain (courbe d'audibilité humaine) :
$HearingRangesMin(w) < I_{sonore} < HearingRangesMax(w)$
📁 Puits:RhpString=Espace Problème : Ingénierie Système
📁 Source:RhpString=Espace Solution : Ingénierie Physiologique

Figure 157 : Exigence physiologique ($R_{IPhy-1.1}$) : plage de perception sonore chez l'humain

⁷³ <http://sound.westhost.com/articles/fadb.htm>

Partie 4 : Co-spécification exécutable de constituants d'actionnement et de mesurage intelligents du système CISPI

Dans ce cas, HearingRangesMin(w) et HearingRangesMax(w) sont deux fonctions mathématiques retournant respectivement les valeurs minimale et maximale de l'intensité sonore définies par le champ auditif de l'humain en fonction de la fréquence (w) du signal sonore. De plus, à partir de cette exigence ($R_{Phy-1.1}$), l'**espace-solution** d'ingénierie en physiologie dérive une nouvelle exigence ($R_{Phy-1.2}$) (Figure 158) spécifiant selon la fréquence du signal (w), la durée minimale du signal sonore à émettre afin de garantir la « bonne » perception par un humain « puits ».

«Requirement» Duree_Alarme_Sonore
ID = RIPhy-1.2
La durée (Delta_T) du son entendu par l'opérateur humain doit être au moins égale à l'inverse de la fréquence (w) du son (considéré comme pur) : $\Delta T > 1/w$
 Puits:RhpString=Espace Problème : Ingénierie Système  Source:RhpString=Espace Solution : Ingénierie Physiologique

Figure 158 : Exigence ($R_{Phy-1.2}$) : Durée minimale alarme sonore

Enfin, afin de faciliter la « bonne » détection auditive de l'alarme sonore, l'ingénieur en physiologie recommande en plus que le sous-système binaural (les deux oreilles) de l'opérateur soit aligné avec la source sonore, introduisant ainsi une nouvelle exigence ($R_{Phy1.3}$) de nature anthropométrique (Figure 226).

«Requirement» Alignement_Antropometrique_Alarme
ID = RIPhy1.3
Les axes anthropométriques de l'opérateur doivent être alignés pour satisfaire le système binaural pour assurer la localisation de la source sonore
 Puits:RhpString=Espace Problème : Ingénierie Système  Source:RhpString=Espace Solution : Ingénierie Physiologique

Figure 159 : Exigence physiologique ($R_{Phy-1.3}$) : Alignement anthropométrique entre les constituants technique « source » et humain « puits »

Interaction fonctionnelle de propagation sonore

Ce constituant « Source/Puits » contextualise l'interaction de détection sonore d'un son pur (*et plus généralement d'un signal sonore quelconque*) en définissant mathématiquement la dépendance de l'intensité sonore à la pression sonore selon :

Partie 4 : Co-spécification exécutable de constituants d'actionnement et de mesure intelligents du système CISPI

$$I_{sonore} = 10 \text{Log}_{10}((P_{rms}/P_0))^2 = 20 \text{Log}_{10}(P_{rms}/P_0) \quad (27)$$

$$P_{rms} = \left(\frac{1}{\Delta T} \int_t^{t+\Delta T} (P(r, t))^2 dt \right)^{1/2} \quad (28)$$

$$P(r, t) = \left(\frac{\rho_0 c E}{4\pi r^2} \right)^{1/2} \sin(\omega t) \quad (29)$$

Avec :

- P_{rms} = pression efficace
- P = pression sonore dépendant des coordonnées d'espace (r) et de temps (t) (Bjørner, 2008)
- E = puissance sonore de la source sonore
- c = vitesse du son
- ρ_0 = masse volumique de l'air
- r = distance source-puits

Notons que les paramètres « c » et ρ_0 dépendent de la température, de l'humidité et de la pression atmosphérique évaluées dans le milieu de la propagation du son. De plus, l'équation (29) montre que la puissance sonore diminue en fonction de la distance avec la source. En ce sens, l'interaction sonore apparaît fortement contextualisée en dépendant de paramètres liés à l'environnement de propagation du son. Ceci est d'autant plus vrai dans un environnement industriel (*tel que celui de la conduite d'une centrale de production électrique*) où plusieurs sources sonores peuvent se superposer. En se référant aux standards en vigueur tels que (NF S32 001, 1975), l'**espace-solution** d'ingénierie physiologique dérive une nouvelle exigence (R_{IPhy2}) spécifiant que l'intensité d'une alarme sonore (I_{sonore}) doit être supérieure de 10 dB au niveau sonore ambiant (I_{Bruit}).

«Requirement» Bruits_fonds
ID = RIPhy2
L'intensité sonore I_{sonore} doit être 10dB supérieure au niveau sonore ambiant :
$I_{sonore} - I_{bruit} > 10 \text{ dB}$
 Puits:RhpString=Espace Problème : Ingénierie Système  Source:RhpString=Espace Solution : Ingénierie Physiologique

Figure 160 : Exigence physiologique (R_{IPhy2}) : Intensité signal sonore – bruits de fonds

Constituant technique d'émission sonore

En tenant compte des deux spécifications précédentes, ce constituant « source » doit satisfaire, entre autres, à l'exigence ($R_{IPhy1.1}$), relative à la quantité d'onde de pression requise pour détecter un son, l'**espace-solution**

Partie 4 : Co-spécification exécutable de constituants d'actionnement et de mesurage intelligents du système CISPI

d'ingénierie physiologique dérive une nouvelle exigence (R_{IPhy3}) contraignant l'objet technique « source » au regard des contraintes de l'environnement opérationnel selon la loi définie par (Müller & Möser, 2012).

«Requirement» Fréquence_Alarme_Sonore
ID = RIPhy3
La source sonore doit générer une onde sonore de fréquence (w) comprise entre 16Hz et 20kHz avec une puissance « sonore » dépendante de la fréquence suffisante.
 Puits:RhpString=Espace Problème : Ingénierie Système
 Source:RhpString=Espace Solution : Ingénierie Physiologique

Figure 161 : Exigence technique ($R_{IPhy,2}$) : Intensité signal sonore – bruits de fonds

L'ensemble de ces exigences d'ingénierie physiologique définissent un premier modèle de l'interaction physico-physiologique de détection sonore d'une alarme et peuvent ainsi être prescrites à l'**espace-problème** d'ingénierie système sous forme d'un diagramme pour validation (Cf. Annexe 8.2 - Figure 228). Néanmoins ce premier niveau descriptif de modélisation n'est pas suffisant pour notre heuristique de co-spécification système qui requiert de prescrire un modèle constitutif d'une exécution d'ensemble avec d'autres modèles.

8.2.3. Spécification prescriptive d'un modèle exécutable constitutif d'une interaction physico-physiologique de détection sonore

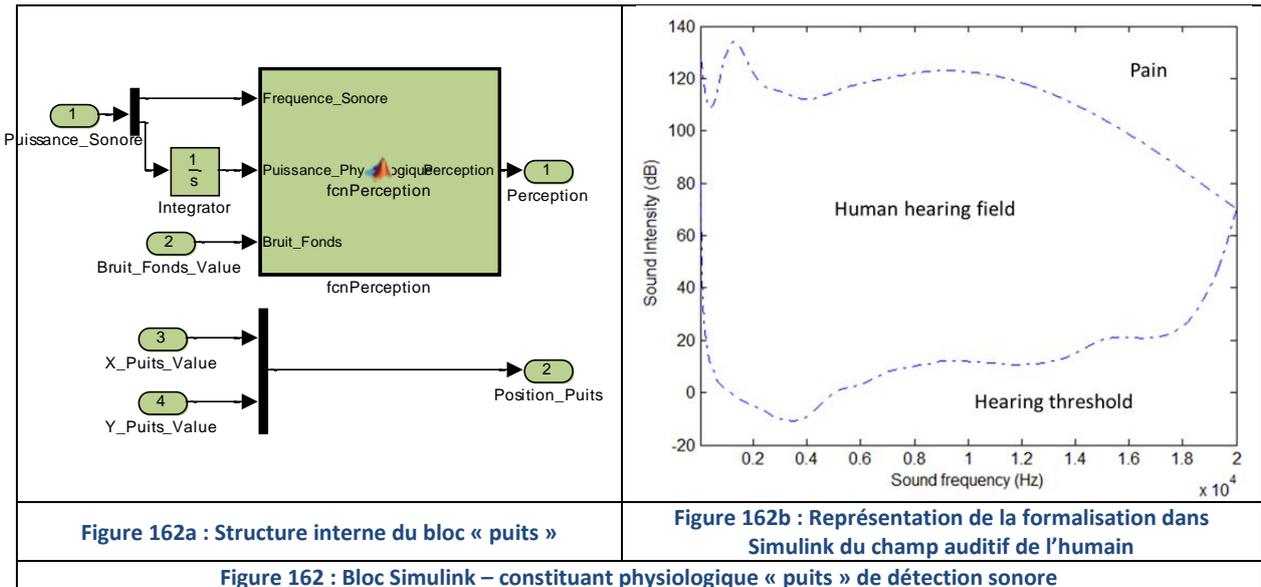
8.2.3.1. Eléments de modélisation exécutable d'une interaction physico-physiologique

Afin de construire un modèle exécutable de l'interaction de détection sonore, l'**espace-solution** d'ingénierie physiologique a dû sélectionner le langage et l'outil de modélisation le plus adapté à notre contrainte de co-simulation système. Dans un premier temps, nous avons évalué l'outil PhysioMatica™ (Bennani, Chauvet, Chauvet, Dupont, & Jouen, 2009) pour lequel notre expert en physiologie a contribué au développement au sein de VFS-Bio™. Cet outil, basé sur le cadre de modélisation de la MTIP avec pour objectif la modélisation et la simulation des fonctions physiologiques intégrées du vivant, n'a pas eu le degré de maturité technique suffisant pour l'environnement visé par nos travaux. Dans un second temps, nous nous sommes intéressés aux bibliothèques Modelica dédiées à la modélisation en physiologie (Mateják, et al., 2014) . Cependant, il s'est avéré que le niveau de représentation retenu pour ces librairies était à un niveau logique/organique ce qui ne couvrait pas notre besoin de représentation à un niveau d'abstraction fonctionnel. Ces différents constats ont motivé le choix de l'**espace-solution** d'ingénierie physiologique de sélectionner l'outil Simulink®, afin de lui permettre la mise en équation sous forme de blocs constitutifs de l'interaction physico-physiologique de détection sonore, tout en offrant les capacités de se coupler au bus de co-simulation: *Cosimate*. En ce sens, nous présentons dans la suite de ce paragraphe, la formalisation des blocs technique « source » et physiologique « puits » ainsi que de l'interaction fonctionnelle, sous la forme de diagramme fonctionnel Simulink®.

Partie 4 : Co-spécification exécutable de constituants d'actionnement et de mesure intelligents du système CISPI

Bloc physiologique de détection sonore

Ce bloc physiologique « puits » est caractérisé par sa position (X_Puits_Value , Y_Puits_Value) ainsi que par une sous-fonction : « *fncPerception* » (Cf. Annexe 8-3 – Fonction Perception) dont l'objectif est de calculer la bonne détection (ou non) de l'alarme sonore (booléen *Perception*) tenant compte de la fréquence (*Frequence_Sonore*) et de la puissance (*Puissance_Physiologique*) de la source sonore, mais également du bruit ambiant (*Bruits_Fonds*) (Figure 162a).



De façon plus détaillée, cette fonction (*fncPerception*) concrétise l'exigence physiologique ($R_{IPhy1.1}$) en comparant le résultat du calcul de l'intensité sonore reçue au niveau du canal auditif avec la limite haute (*HearingRangeMax(w)*) et la limite basse (*HearingRangeMin(w)*) du champ auditif humain.

Bloc d'interaction de propagation sonore

Ce bloc d'interaction fonctionnelle « Source/Puits » (Figure 163) formalise la propagation de l'onde sonore à travers le milieu contextualisé de la conduite des centrales de production. En ce sens, il prend en compte la vitesse (ou célérité (c)) du son variant en fonction de la température et de la masse volumique du milieu de propagation (ρ), ainsi que la distance entre le constituant technique source (X_Source , Y_Source) et humain puits (X_Puits , Y_Puits) pour évaluer l'amplitude du signal source au niveau du puits (Cf. Annexe 8-3 – Fonction Amplitude).

Partie 4 : Co-spécification exécutable de constituants d'actionnement et de mesureage intelligents du système CISPI

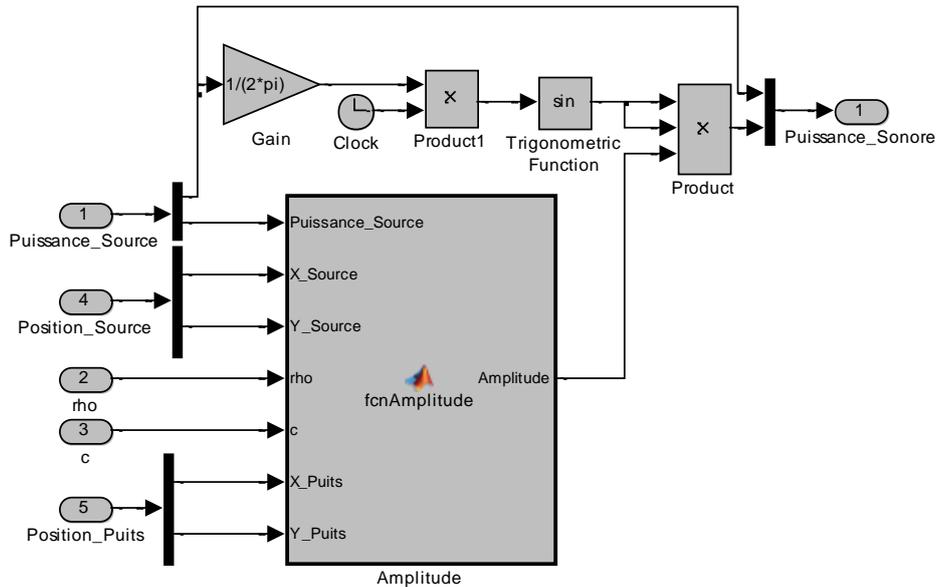


Figure 163 : Bloc Simulink – Interaction fonctionnelle de propagation sonore

Bloc technique d'émission sonore

Ce bloc technique « source » d'émission sonore est caractérisé par sa position (X_Source , Y_Source). Quant au son émis par la source technique, celui-ci est caractérisé par sa fréquence ($Frequence_Source_Value$) et sa puissance ($Puissance_Value$). Le block « *switch* » permet d'activer ou de désactiver l'émission du son en fonction de la valeur de la variable « *reqAlarme* » (Figure 164).

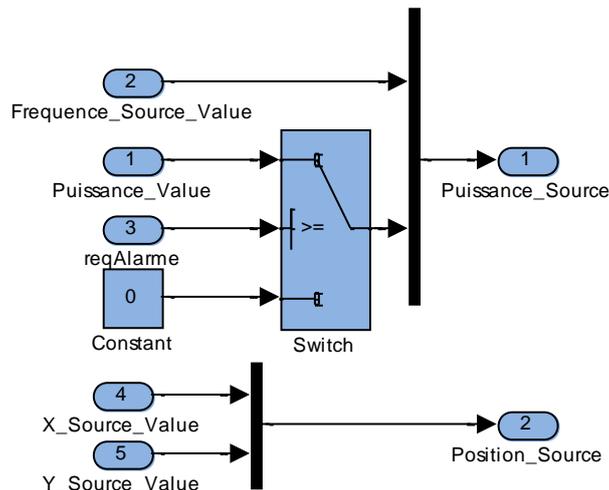


Figure 164 : Bloc Simulink – bloc technique « source » d'émission sonore

Une fois l'ensemble des blocs constituant l'interaction de détection sonore spécifiés dans l'outil Simulink, l'espace-solution d'ingénierie physiologique les architecture les uns par rapports aux autres selon le patron architectural d'une interaction fonctionnelle (Figure 154).

Partie 4 : Co-spécification exécutable de constituants d'actionnement et de mesure intelligents du système CISPI

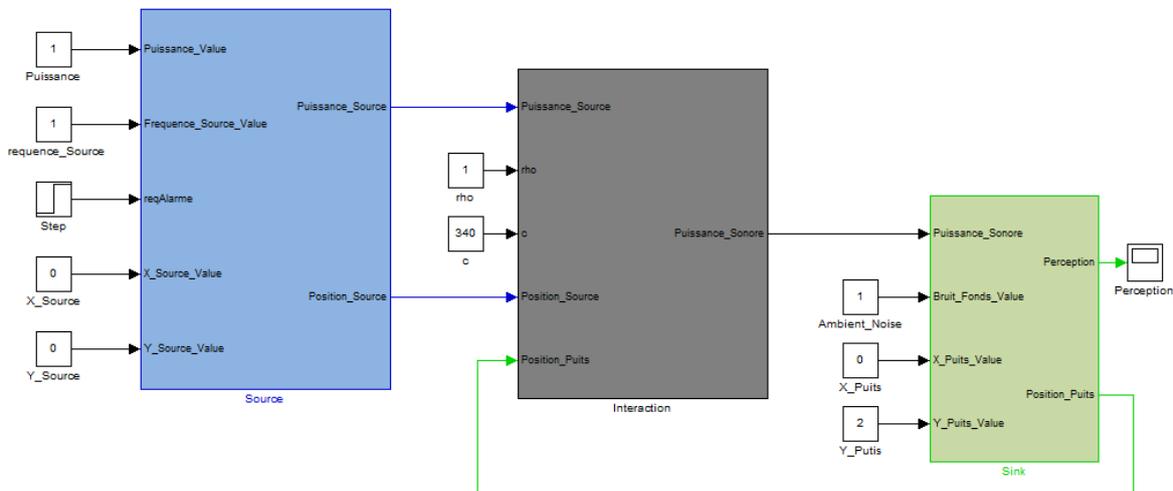


Figure 165 : Diagramme Simulink de l'interaction de détection sonore entre un constituant technique « source » et un constituant physiologique « puits ».

Vérification par exécution du modèle d'interaction

L'ingénieur en physiologie est ainsi en mesure de vérifier la cohérence intrinsèque de son modèle d'interaction de détection sonore en simulant le modèle avec l'outil Simulink selon différents scénarios de tests. En ce sens, nous présentons dans la suite de ce paragraphe quelques scénarios que nous illustrons à travers les traces d'exécution du modèle.

Le premier scénario de test consiste à vérifier que la puissance sonore reçue par le bloc humain « puits » décroît en fonction de la distance avec le bloc technique « source ». Cette vérification montre que, pour une puissance et une fréquence d'émission constante, la puissance sonore reçue par le bloc « puits » décroît en même temps que la distance entre les deux blocs augmente (Figure 166). Notons également qu'à partir d'un certain seuil (Puissance Sonore < 11 Watts) l'alarme sonore n'est plus détectée par le bloc humain « puits ».

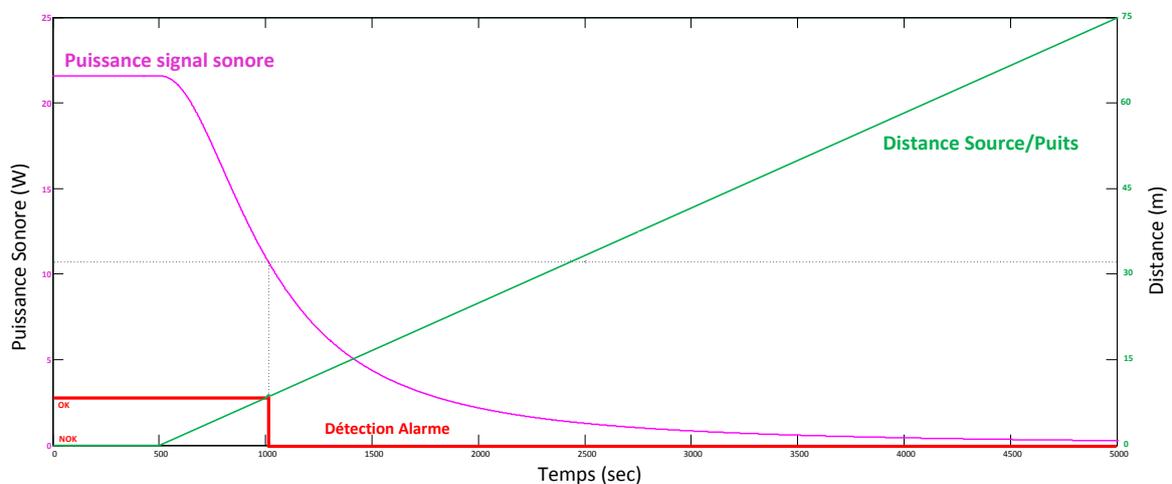


Figure 166 : Puissance sonore (W) en fonction de la distance « Source/Puits »

Partie 4 : Co-spécification exécutable de constituants d'actionnement et de mesure intelligents du système CISPI

Le second scénario de test consiste à vérifier que la détection du signal sonore par un bloc humain est conditionnée par le champ auditif humain. En observant la trace d'exécution ci-dessous (Figure 167), nous remarquons que pour une fréquence du signal sonore supérieure à 20 KHz la détection de l'alarme n'est plus assurée. Cela correspond aux résultats attendus étant donné que le signal n'est plus compris dans le champ auditif humain.

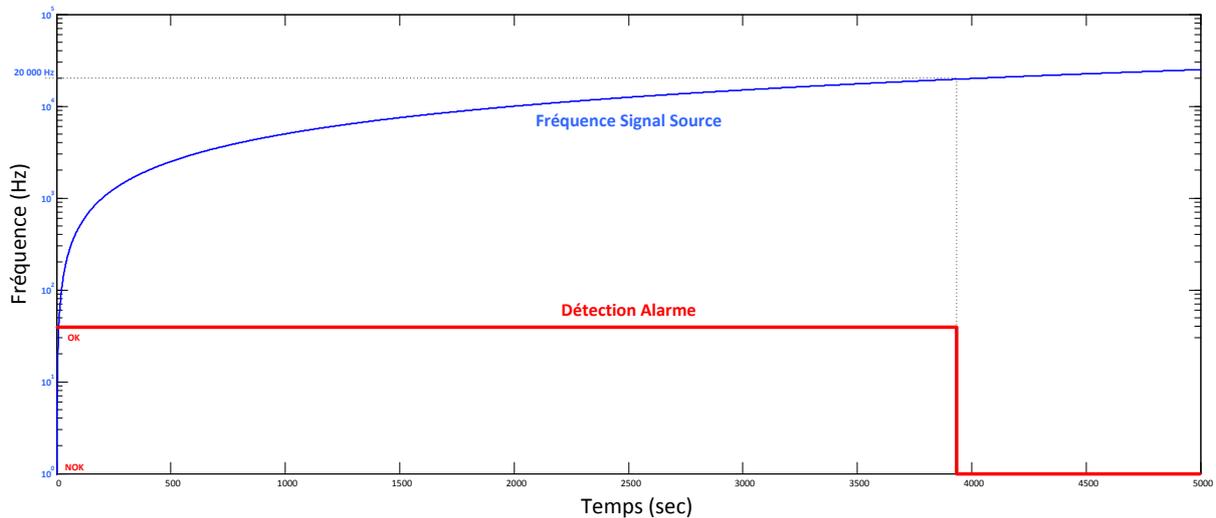


Figure 167 : Détection de l'alarme sonore en fonction de la fréquence du signal

Le dernier scénario de test que nous présentons consiste à vérifier la prise en compte du bruit de fond dans le modèle de l'interaction de détection sonore. Nous observons dans la trace d'exécution (Figure 168) que pour un bruit de fond supérieure à 10 dB au bruit émis par la source sonore, la détection de l'alarme par un bloc humain n'est plus assurée. En ce sens, la propriété d'atténuation du bruit par rapport au bruit ambiant est bien prise en compte au niveau du modèle constitutif de l'interaction.

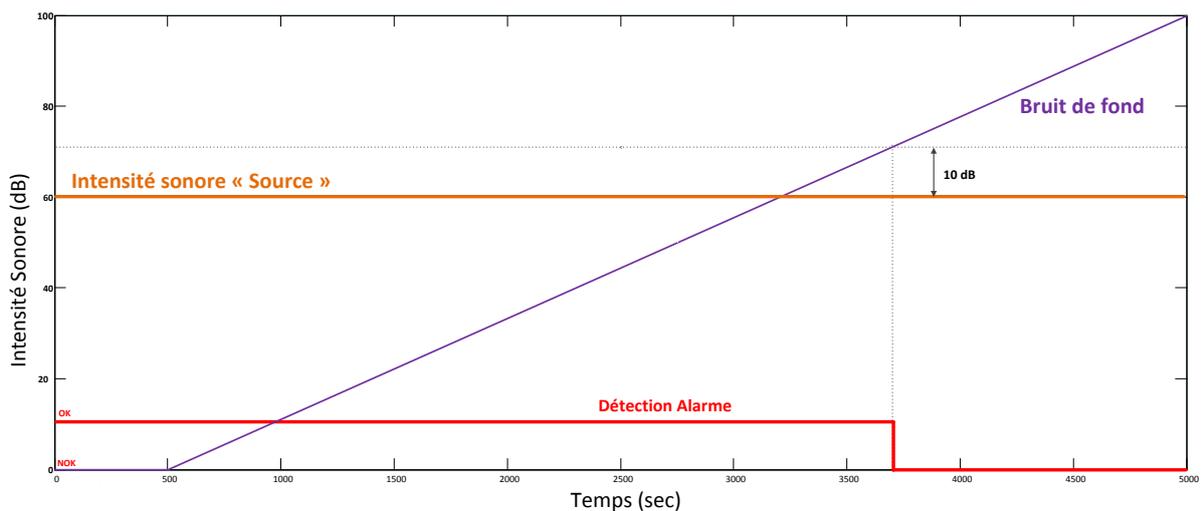


Figure 168 : Détection de l'alarme en fonction du bruit de fond

Ainsi en déroulant un ensemble de scénarios de test, l'espace-solution d'ingénierie physiologique est en mesure de vérifier la construction de son modèle (M_{hIM}) à posteriori. Une fois la spécification de l'interaction

Partie 4 : Co-spécification exécutable de constituants d'actionnement et de mesurage intelligents du système CISPI

de détection sonore (S_{IPhy}) vérifiée, le domaine d'ingénierie physiologique doit prescrire en langage commun SysML sa solution au domaine d'ingénierie système pour validation.

8.2.3.2. Définition d'un modèle exécutable de l'interaction physico-physiologique ciblée

A cette étape du scénario de co-spécification système, l'espace-solution d'ingénierie physiologique doit prescrire à l'espace-problème d'ingénierie système au minimum les interfaces du bloc d'interaction de détection sonore afin que ce dernier puisse l'architecturer avec l'ensemble des modèles spécialistes constitutifs du modèle global afin de valider en co-simulation son comportement global en regard du système visé. En ce sens, l'ingénieur en physiologie doit transposer l'essentiel des informations d'interopération de son modèle Simulink en langage SysML afin de constituer un référentiel partagé de modèles avec l'ensemble des ingénieries spécialistes. En ce sens, l'ingénieur en physiologie applique la même démarche que l'ingénieur d'automatisation (dans le chapitre 6) qui transpose sa spécification du constituant de contrôle en langage Simulink vers le langage SysML en se référant à une table de correspondance entre les éléments de modélisation des deux langages (Chapitre 6).

Ainsi, l'ingénieur en physiologie restreint la transposition de son modèle (M_{hIM}) d'un point de vue structural en représentant l'architecture externe de l'interaction de détection sonore dans un diagramme de définition de blocs SysML, ainsi que sa structure interne dans un diagramme interne de blocs SysML. Notons que d'un point de vue comportemental, les équations traduisant la propagation du son d'un bloc technique « source » vers un bloc physiologique « puits » auraient pu être formalisées dans des diagrammes paramétriques SysML (Cf. Chapitre 5). Dans le diagramme de définition de blocs, la structure hiérarchique de l'interaction de détection sonore (« blocks » SysML : « *Interaction_Detection_Sonore* ») est représentée par une relation de composition SysML de l'ensemble des « blocks » SysML constitutifs : « *Emission_Sonore*, *Interaction_Fonctionnelle*, *Detection_Sonore* » (Figure 169).

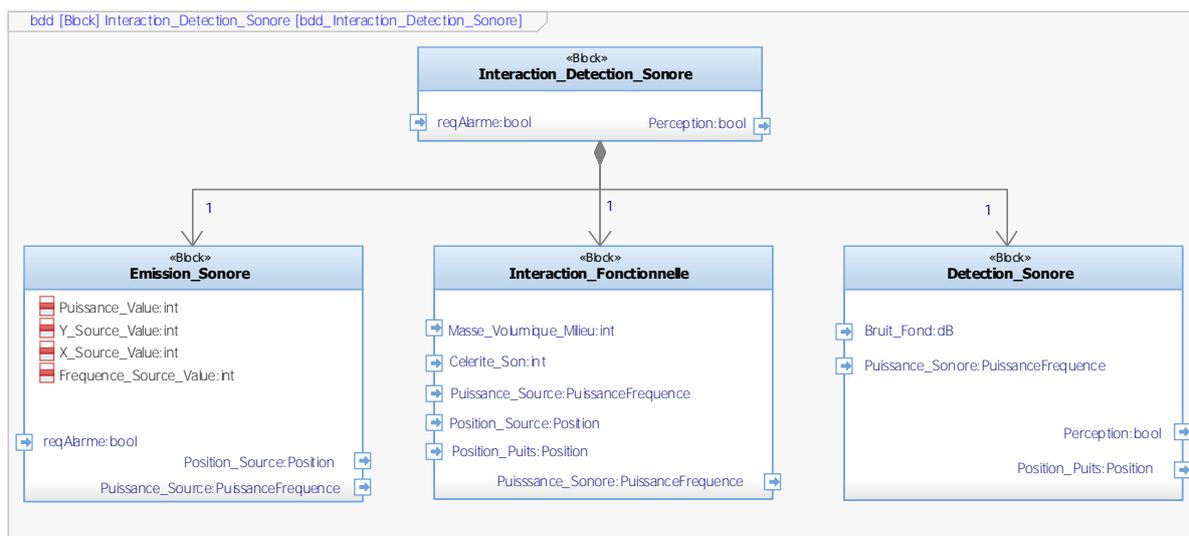


Figure 169 : Diagramme de définition de blocs (bdd) - Architecture externe de l'interaction de détection sonore

La structure interne de l'interaction de détection sonore est quant à elle modélisée dans un diagramme interne de blocs SysML représentant les flux échangés entre les différents constituants de l'interaction (« Part » :

Partie 4 : Co-spécification exécutable de constituants d'actionnement et de mesure intelligents du système CISPI

Bloc_Technique_Source, *Bloc_Source_Puits*, *Bloc_Humain_Puits*) au travers de « connecteurs » SysML reliant des « FlowPorts » indiquant la direction ainsi que le type de flux (Figure 140).

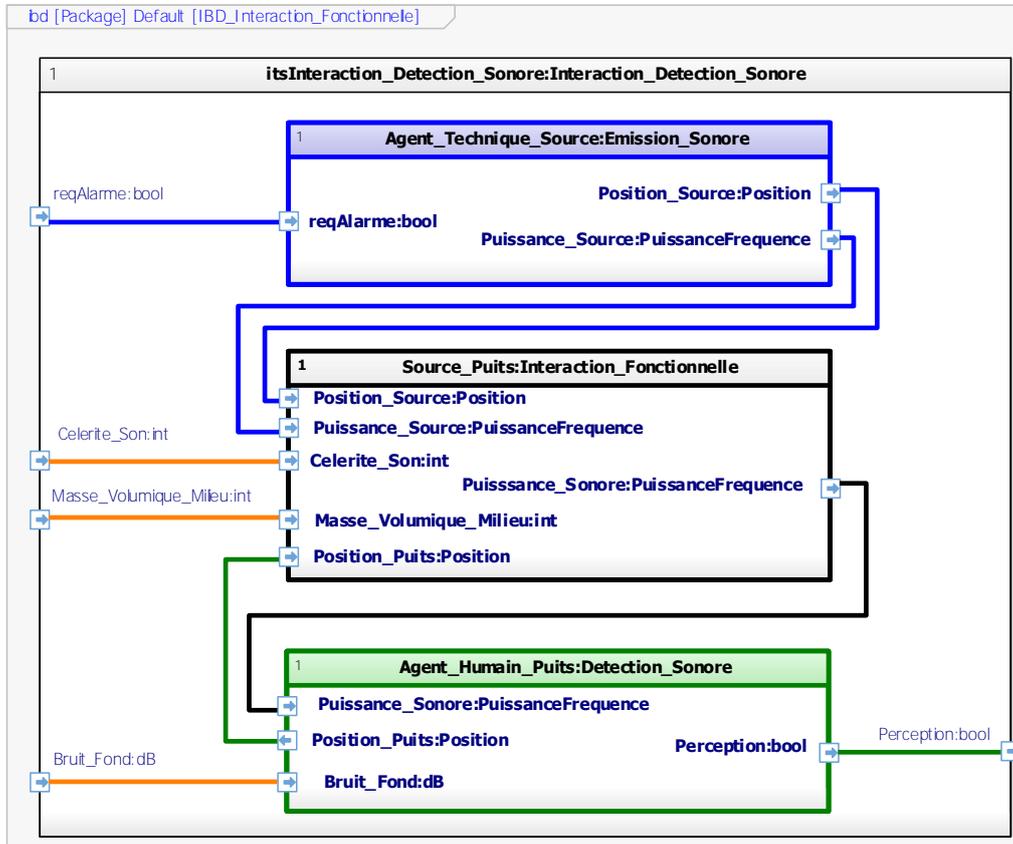


Figure 170 : Diagramme interne de bloc (ibd) - Structure interne de l'interaction de détection sonore

Cela permet à l'**espace-solution** d'ingénierie physiologique de conserver la connaissance (K_{IPhy}) de son modèle (M_{HIM}) à l'intérieur de son domaine d'expertise.

D'un point de vue comportemental, le modèle « d'interaction de détection sonore » spécifié selon un ensemble d'équations est validé par co-exécution de modèles en interaction avec le modèle opérationnel de conduite, ainsi que les modèles constitutifs des parties physique et logique de la plate-forme CISPI.

8.3. Co-intégration système d'un constituant d'interaction physico-physiologique de détection sonore

La validation système d'un élément, modèle ou composant, constitutif d'un modèle global, requiert son intégration dans une situation réelle conformément à la définition formelle d'une spécification ou la reflétant au mieux en pratique par niveaux de maturité technologiques⁷⁴.

⁷⁴ Ces travaux se situent aux niveaux 4 et 5 d'une échelle TRL

Partie 4 : Co-spécification exécutable de constituants d'actionnement et de mesurage intelligents du système CISPI

8.3.1. Intégration d'un modèle constitutif de l'interaction physico-physiologique ciblée

Au cours de cette étape du scénario de co-spécification système, l'**espace-problème** d'ingénierie système valide la spécification ($S_{I\text{Phy_SysML}}$) de l'**espace-solution** d'ingénierie physiologique. Cette activité est réalisée par co-exécution de modèles afin de s'assurer que le modèle de l'interaction de détection sonore interopère avec l'ensemble des modèles constitutifs du **modèle global** (*modèle opérationnel, modèle des constituants physiques, de contrôle et de commande*) afin de satisfaire l'ensemble des exigences système ($R_{IS_Phy_SysML}$).

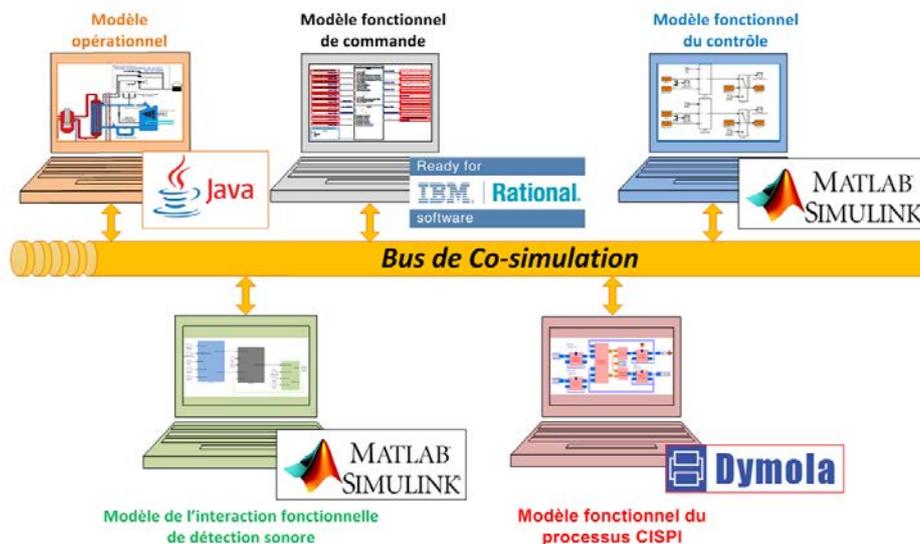


Figure 171 : Environnement de co-simulation système pour la validation de la spécification ($S_{I\text{Phy}}$) d'une interaction de détection sonore

En ce sens, l'espace-problème d'ingénierie système architecture l'ensemble des modèles des ingénieries spécialistes constitutifs de la plate-forme CISPI (« Parts » SysML : *itsInteraction_Detection_Sonore_1, itsSous_Systeme_Logique, itsSous_Systeme_Physique*). Cette spécification exécutable, sous forme d'un diagramme interne de blocs SysML, représente les liens et flux échangés entre les différents constituants de la plate-forme ainsi qu'avec son environnement (« Part » SysML : *Circuit_Primaire*) (Figure 172) (Cf. Annexe 8-4). Notons que le modèle constitutif de l'interaction de détection sonore nous amène à raffiner le modèle global de la plate-forme CISPI afin de prendre en compte les nouvelles interfaces. En ce sens, nous raffinons :

- Le modèle constitutif du contexte opérationnel afin de prendre en compte les paramètres liés aux bruits de fond (**Bruits_Fond**) de la salle où se situe la plate-forme CISPI du CRAN, ainsi que la masse volumique de l'air (**Masse_Volumique_Milieu**) contenu dans cette salle et par conséquent la vitesse de propagation du son (**Celerite_Son**) dans cet environnement.
- Le modèle constitutif de conduite (contrôle) afin d'élaborer l'ordre (**reqAlarme**) de mise en service (hors service) de l'alarme technique sonore. Cet ordre est calculé par une fonction de contrôle prenant en compte la présence d'eau au niveau du constituant physique
- Le modèle constitutif du procédé afin de renvoyer au constituant de contrôle la donnée physique de la présence d'eau (ou non) (**Presence_Eau**) au niveau du sol de la plate-forme CISPI. Le renvoi de cette donnée requière un observateur humain ou technique au niveau du procédé.

Partie 4 : Co-spécification exécutable de constituants d'actionnement et de mesurage intelligents du système CISPI

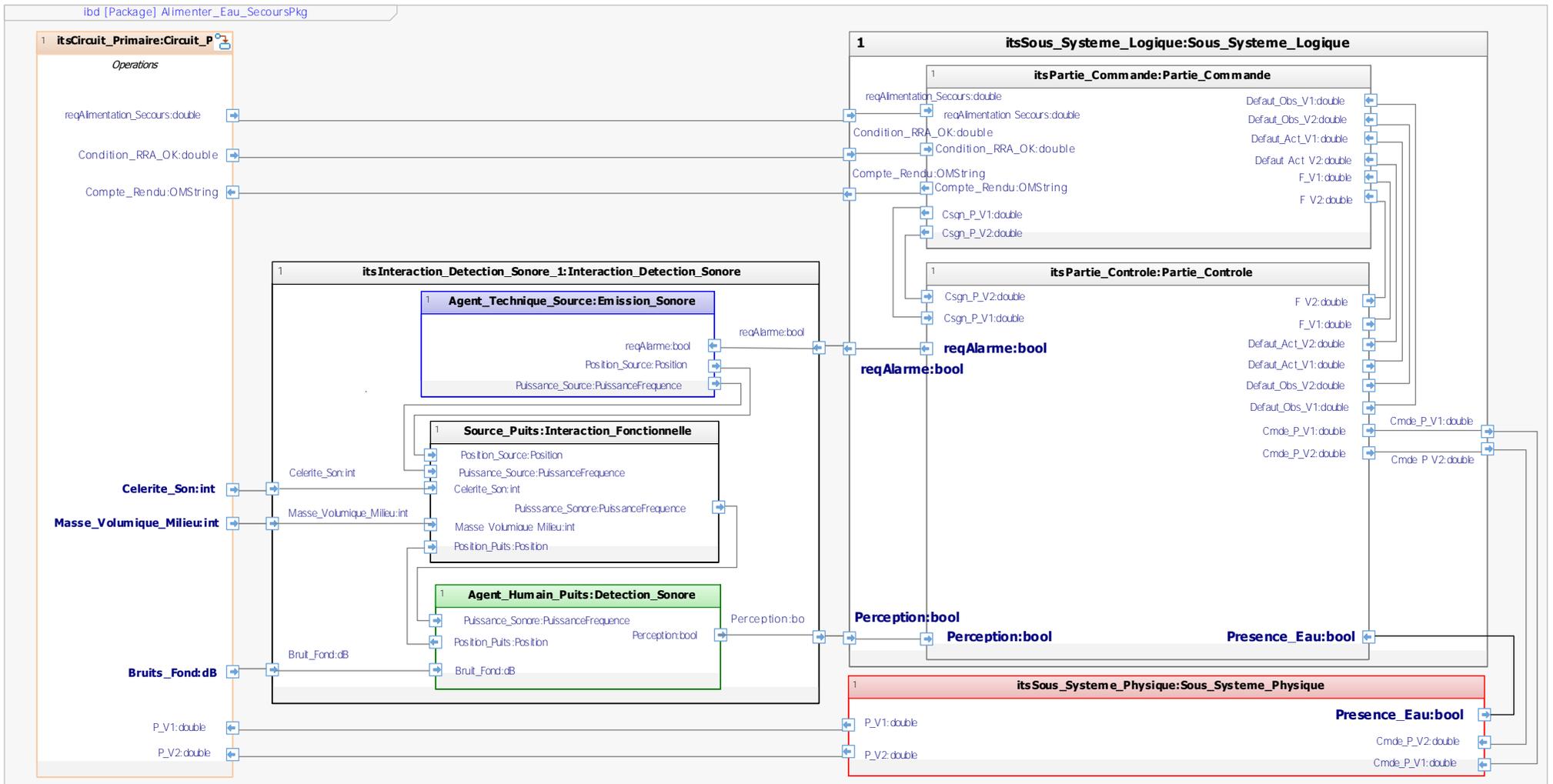


Figure 172 : Définition de l'architecture de co-simulation système (Bloc d'interaction de détection sonore + bloc logique + bloc physique) par l'espace-problème d'ingénierie système

Partie 4 : Co-spécification exécutable de constituants d'actionnement et de mesurage du système de conduite CISPI

Ainsi, en exécutant un ensemble de scénarios en co-simulation système, l'**espace-problème** d'ingénierie système est en mesure d'évaluer si le comportement global du système étudié satisfait l'ensemble des exigences systèmes.

Prenons l'exemple des deux scénarios suivants, dont l'objectif est de valider la puissance de l'alarme technique pour une fréquence donnée (20 Hz), afin que l'agent humain puisse « bien » détecter l'alarme sonore en situation opérationnelle de conduite.

Dans le cas du scénario 1 (Figure 173), on remarque que la fonction de contrôle détecte correctement la présence d'eau. Le temps entre l'apparition de l'événement « Presence_Eau » et l'élaboration de l'ordre « ReqAlarme » correspond à un cycle d'exécution de la fonction de contrôle. En ce sens, l'exigence système de contrôle ($R_{IS_Aut_Cont2}$) est satisfaite. En revanche, nous constatons que dans ce contexte opérationnel, la puissance de l'alarme sonore n'est pas suffisante pour que cette dernière soit détectée « Perception » par l'agent humain situé à cinq mètres de la source. Par conséquent, les exigences systèmes ($R_{IS_Phy1.1}$) et ($R_{IS_Phy1.2}$) ne sont pas satisfaites.

Dans le cas du scénario 2 (Figure 174), on conserve les mêmes conditions (paramètres) que pour le scénario 1, uniquement la puissance de l'alarme technique est augmentée de 0,5 Watts. En exécutant ce scénario par co-exécution de modèles, on constate que cette fois-ci l'agent humain détecte l'alarme sonore. Les exigences systèmes ($R_{IS_Phy1.1}$) et ($R_{IS_Phy1.2}$) sont ainsi satisfaites, l'ingénieur système est alors en mesure de valider la configuration système associée au scénario 2.

Scénario 1

Condition initiale :

Distance Alarme Technique (Source) / Agent Humain (Puits) = 5 mètres	Masse volumique de l'air (Température = 20 °C) = 1,2 kg/m ³
Célérité du son = 331,5 m/s	Bruit de fond = 90 dB
Puissance Alarme = 0.7 W	Fréquence Alarme = 20 Hz

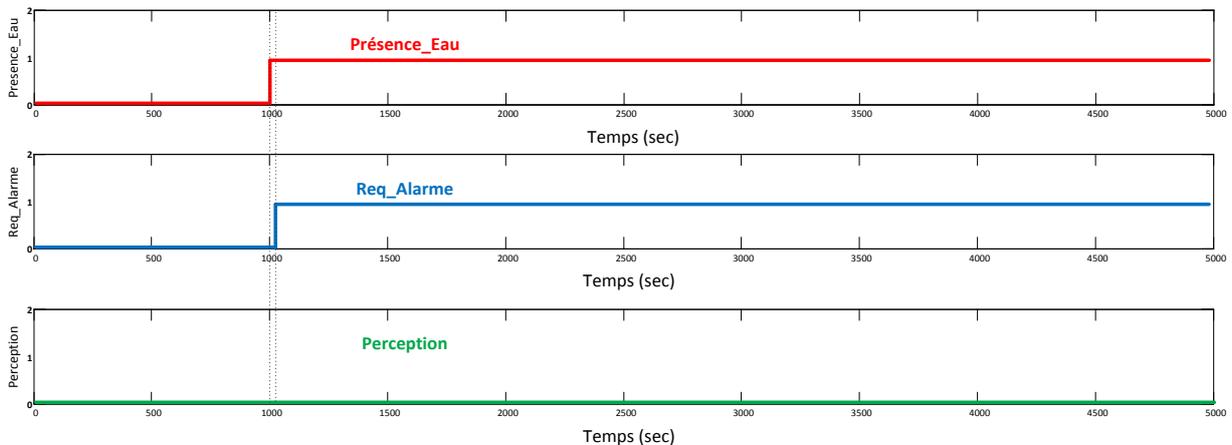


Figure 173 : Trace d'exécution du scénario 1 de validation de l'interaction de détection sonore

Partie 4 : Co-spécification exécutable de constituants d'actionnement et de mesure du système de conduite CISPI

Scénario 2

Condition initiale :

Distance Alarme Technique (Source) / Agent Humain (Puits) = 5 mètres	Masse volumique de l'air (Température = 20 °C) = 1,2 kg/m ³
Célérité du son = 331,5 m/s	Bruit de fond = 90 dB
Puissance Alarme = 1.2 W	Fréquence Alarme = 20 Hz

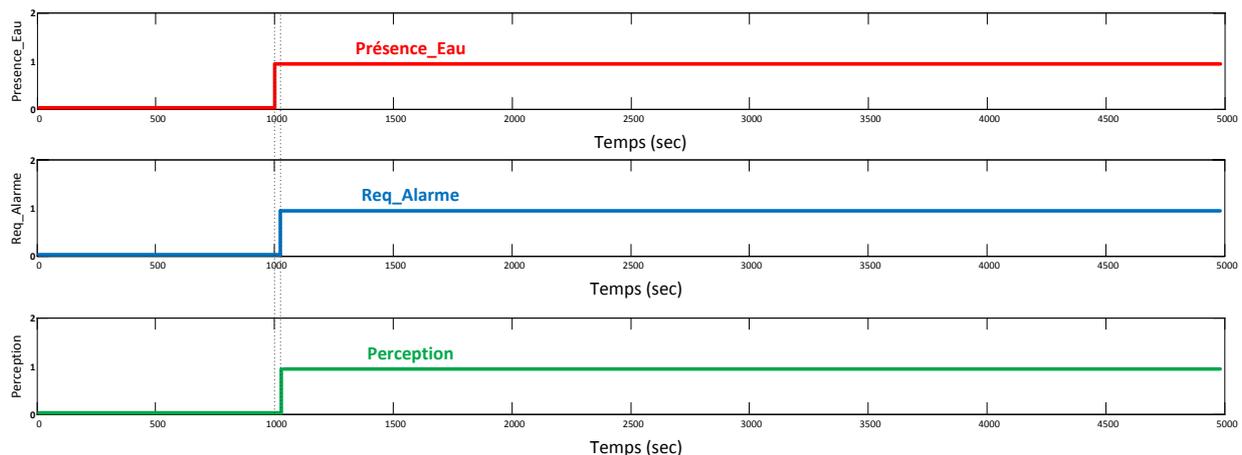


Figure 174 : Trace d'exécution du scénario 2 de validation de l'interaction de détection sonore

8.3.2. Intégration d'un composant constitutif de l'interaction physico-physiologique ciblée

Ces travaux exploratoires, en complément de ceux de (Lieber, 2013), posent cependant la question de la validation système d'un modèle « in-silico »⁷⁵ au facteur d'échelle de l'ensemble des facteurs humains dans un contexte donné.

Les travaux complémentaires présentés dans ce paragraphe ont pour objet de montrer que notre environnement de travail pourrait supporter une approche de spécification itérative incluant des plans d'expériences « in-situ » de façon complémentaire, voire alternative, à la modélisation numérique de l'interaction physiologique présentée précédemment. En effet, le modèle constitutif d'interaction de détection sonore est construit de manière théorique selon les fondements de la MTIP et correspond à un premier niveau de spécification pour la compréhension des interactions entre un humain et son environnement. En ce sens, les caractéristiques du constituant humain « Puits » sont décrites selon des caractéristiques générales, ne dépendant pas de :

- Des multi-interactions avec les autres sens : Des études récentes montrent que les frontières sensorielles sont floues et que les cinq sens interagissent les uns avec les autres (Bleicher, 2014)

⁷⁵ Expression courante en « Ergonomie » par rapport à « in-vivo » pour qualifier les situations de modélisation de l'Humain

Partie 4 : Co-spécification exécutable de constituants d'actionnement et de mesurage du système de conduite CISPI

- La variabilité chez les humains : Les opérateurs diffèrent les uns des autres de par leurs caractéristiques physiologiques, psychologiques et cognitives. Par exemple, la qualité de la vue et de l'ouïe dépendent de l'âge.
- Des situations de conduite : il a été montré que les situations incidentelles ou accidentelles sources de stress, peuvent avoir des effets sur l'attention, la mémoire, la performance perceptivo-motrice ou les capacités de jugements et de décision (Staal, 2004) aboutissant in fine à une perturbation de la performance humaine opérationnelle.

Il apparaît ainsi que le constituant de détection sonore étudié est fonction de nombreux facteurs⁷⁶ (pouvant être dépendants les uns des autres). Le problème du modélisateur est alors d'identifier l'influence de ces facteurs sur la réponse⁷⁷ du système. N'ayant pas l'ensemble des connaissances pour relier mathématiquement ces paramètres entre eux, cette étape peut s'effectuer de manière expérimentale en imposant différentes valeurs aux facteurs et en mesurant les réponses obtenues.

Parmi les méthodes expérimentales existantes, nous pouvons citer les méthodes statistiques telles que les plans *d'expériences consistant à sélectionner et ordonner les essais afin d'identifier, à moindres coûts les effets des paramètres sur la réponse du produit*⁷⁸. Cette méthode comporte trois étapes :

1. *Postuler un modèle de comportement du système* (Nous pouvons alors nous référer au modèle obtenu selon la MTIP qui permet de caractériser certains paramètres physiologiques)
2. *Définir un plan d'expériences, c'est-à-dire une série d'essais permettant d'identifier l'influence des facteurs,*
3. *Faire les essais, identifier les coefficients et conclure.*

Maquette d'interaction physico-physiologique

Afin de mettre en œuvre ce type de plan d'expérience, il a été nécessaire de concevoir une maquette « d'interaction physico-physiologique » permettant d'évaluer l'influence de différents facteurs (*puissance sonore, fréquence sonore, bruits ambiants, âge des opérateurs, position dans l'espace...*) sur la bonne détection de l'alarme sonore. Dans l'objectif de reproduire au plus près la réalité, nous avons conçu cette maquette pour qu'elle puisse s'intégrer à la plate-forme CISPI existante et ainsi être immerger dans l'environnement opérationnel lors des différentes séries d'essais.

En ce sens, cette maquette offre la possibilité de sélectionner plusieurs alarmes (de puissance, et de fréquence différentes) à partir d'une interface graphique (Figure 175).

⁷⁶ Facteur : Paramètre que l'on fait varier au cours des essais

⁷⁷ Réponse : Grandeur mesurée lors des essais

⁷⁸ http://www.si.ens-cachan.fr/accueil_V2.php?id=19&page=affiche_ressource

Partie 4 : Co-spécification exécutable de constituants d'actionnement et de mesure du système de conduite CISPI

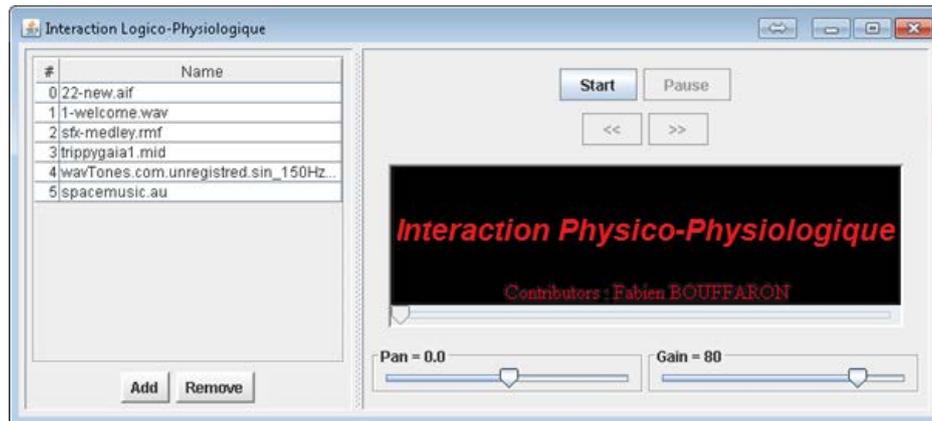


Figure 175 : Interface de la maquette physiologique d'interaction Physico-Physiologique (configuration de l'interaction de détection sonore d'une alarme technique)

Reliée physiquement à la plate-forme CISPI par le réseau de terrain, la maquette se connecte au serveur OPC de la plate-forme pour lire cycliquement une variable automate correspondant à l'ordre (**ReqAlarme**) de mise en service (hors-service) de l'alarme en cas d'une situation incidentelle/ accidentelle (Figure 176).

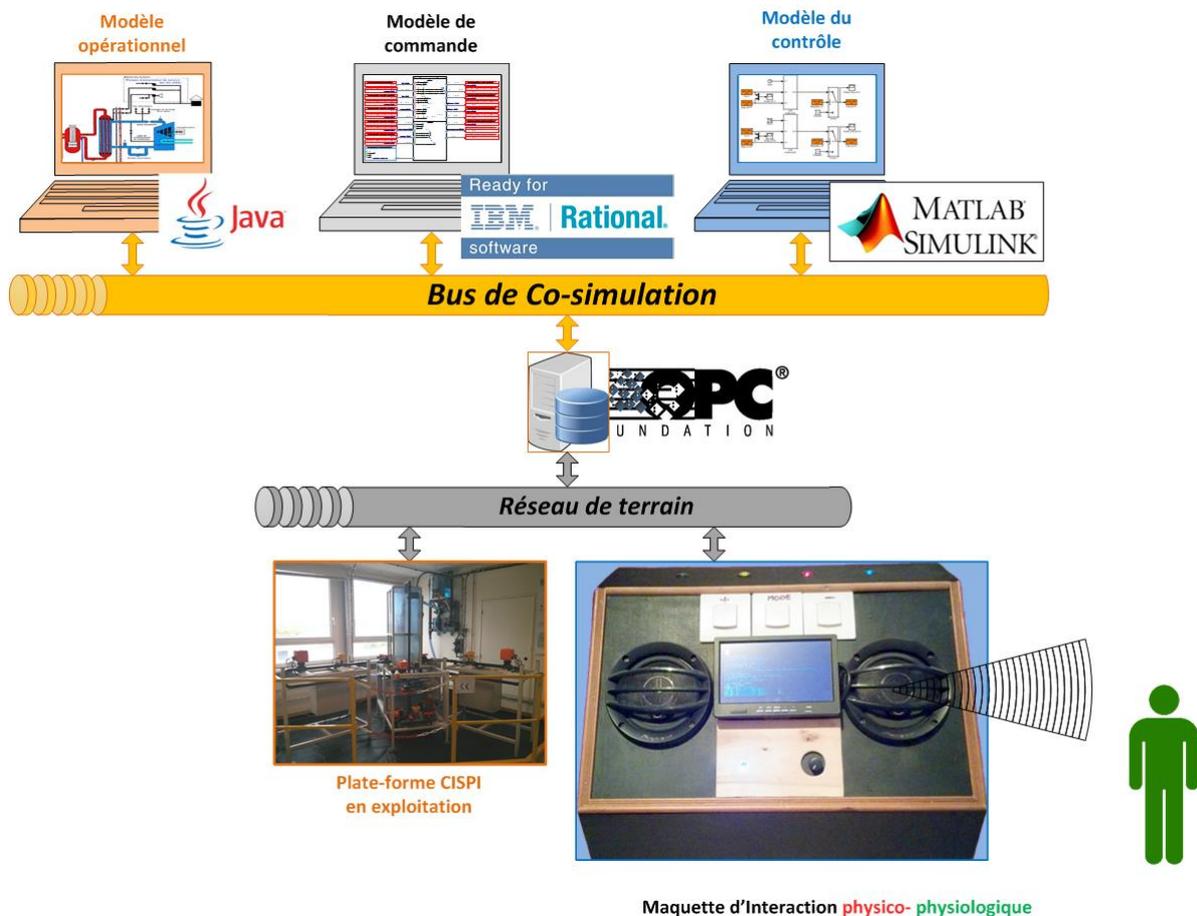


Figure 176 : Maquette physico-physiologique en interface avec la plate-forme CISPI

Partie 4 : Co-spécification exécutable de constituants d'actionnement et de mesurage du système de conduite CISPI

Le cadre d'expérimentation étant défini, le plan d'expérience à mettre en œuvre consisterait à mesurer selon un panel d'opérateurs le plus représentatif possible à partir des conditions initiales de l'interaction de détection sonore s'il y a perception ou non de l'alarme.

Pour des raisons de temps, nous n'avons pas pu réaliser l'ensemble de ces mesures qui devrait s'appuyer sur les ressources techniques d'un organisme spécialisé, tel que l'Institut National de Recherche et de Sécurité de Nancy,. Il est certain que les résultats dérivés de cette expérience nous auraient conduit à raffiner notre modèle d'interaction de détection sonore afin de spécifier au mieux les contraintes requises pour l'alarme technique permettant ainsi d'assurer la bonne détection du signal sonore. Notons cependant que le modèle « in silico » permet de cibler, en complément de techniques de plans d'expériences fractionnaires (Taguchi, 1987), certains paramètres pertinents d'interaction système afin de mettre en place la bonne stratégie pour minimiser le nombre d'essais à réaliser et, simultanément maximiser le nombre de facteurs à étudier.

	Opérateur 1 Age : xxx Sexe : xxx	Opérateur 2 Age : yyy Sexe : yyy	Opérateur 3 Age : zzz Sexe : zzz
Puissance de l'alarme : 60 dB			
Puissance de l'alarme : 80 dB			
Puissance de l'alarme : 90 dB			
Puissance de l'alarme : 100 dB			
Puissance de l'alarme : 110 dB			
Puissance de l'alarme : 120 dB			
Fréquence de l'alarme : 20 Hz			
Fréquence de l'alarme : 2520 Hz			
Fréquence de l'alarme : 5020 Hz			
Fréquence de l'alarme : 7520 Hz			
Fréquence de l'alarme : 10020 Hz			
Fréquence de l'alarme : 12520 Hz			
Fréquence de l'alarme : 15020 Hz			
Fréquence de l'alarme : 17520 Hz			
Fréquence de l'alarme : 20020 Hz			
Fréquence de l'alarme : 22520 Hz			
Fréquence de l'alarme : 25020 Hz			
Distance Alarme (Source) / Opérateur Puits : 1m			
Distance Alarme (Source) / Opérateur Puits : 2m			
Distance Alarme (Source) / Opérateur Puits : 3m			
Distance Alarme (Source) / Opérateur Puits : 4m			
Distance Alarme (Source) / Opérateur Puits : 5m			
Distance Alarme (Source) / Opérateur Puits : 6m			
Distance Alarme (Source) / Opérateur Puits : 7m			
Distance Alarme (Source) / Opérateur Puits : 8m			
Bruit ambiant : 50 dB			
Bruit ambiant : 60 dB			
Bruit ambiant : 70 dB			
Bruit ambiant : 80 dB			
Bruit ambiant : 90 dB			
Bruit ambiant : 100 dB			
Situation normale de conduite			
Situation incidentelle de conduite			

Tableau 19 : Facteurs d'influence pour la détection d'une alarme sonore (Source) par un agent humain (Puits) : Puissance de l'alarme, Fréquence, Distance, Bruit Ambiant, Situation de conduite, Age, Sexe. L'ensemble des essais à mener correspondent à la combinatoire de ces facteurs, pouvant être regroupés sous la forme d'une matrice d'expérience orthogonale

Partie 4 : Co-spécification exécutable de constituants d'actionnement et de mesure du système de conduite CISPI

8.4. Conclusion : Co-spécification exécutable d'un modèle partiel constitutif de la partie « mesure intelligent » ciblée

L'objectif de ce chapitre était de spécifier un élément, sous forme de modèle puis de composant, qui soit constitutif d'une interaction Homme-Artefact du système CISPI. Il a été choisi de limiter cette co-spécification d'un constituant de mesure intelligent à une interaction physico-physiologique de détection sonore.

Ce constituant-système de détection d'une alarme sonore a été co-spécifié entre un **espace-solution** d'ingénierie physiologique à partir du cadre de modélisation de (Lieber, 2013) et un **espace-problème** d'ingénierie système en charge d'architecturer un modèle global exécutable. Ce modèle « in-silico » a permis de déterminer les conditions nécessaires mais non suffisantes à la bonne détection du signal sonore « in-situ » par un agent humain de conduite. Ces conditions se traduisent d'un point de vue technique par le dimensionnement physique du constituant technique « source » afin de garantir l'interaction physico-physiologique de détection sonore par un constituant humain « puits ». Afin de s'assurer de la bonne détection de l'alarme sonore par un agent humain en condition opérationnelle de conduite, la validation-système de ce constituant a été réalisée par co-exécution de modèles avec la plate-forme CISPI dans un premier temps. Nous avons cependant montré, dans un deuxième temps, que notre approche pourrait permettre de guider la construction de plans d'expériences, qui sont les techniques courantes de modélisation au facteur d'échelle de l'ensemble des facteurs humains à prendre en compte en situation. Ces résultats sur la modélisation exécutable d'une interaction physico-physiologique contribuent à la définition de critères mesurables de propriétés physiologiques au plus tôt de l'intégration d'un constituant humain en ingénierie centrée système, comme recommandé par (Boy & Narkevicius, 2013) :

Traditionally, engineering focused on designing and developing machines that were further tested by human factors and ergonomics specialists. Incorporating HSI into SE resulted in identifying and incorporating human capabilities and limitation in system development.

Partie 4 : Co-spécification exécutable de constituants d'actionnement et de mesurage du système de conduite CISPI

Conclusion : Co-spécification d'un modèle total constitutif de l'interaction logico-physico-physiologique ciblée

Nous venons d'illustrer dans cette partie la mise en œuvre de notre environnement de co-spécification système pour la définition de deux modèles constitutifs de l'interaction logico-physique entre le sous-système logique et le sous-système physique de la plate-forme CISPI. En ce sens, nous nous sommes focalisés sur deux interactions de nature différentes :

- interaction technico-physique : entre un constituant technique d'actionnement intelligent « Source » et le processus CISPI « Puits »
- interaction physico-physiologique : entre une alarme sonore « Source » et un constituant humain « Puits » de mesure intelligent

Nous défendons que les propriétés de l'élément « Puits » d'une interaction « Source-Puits » conditionne la définition de l'élément « Source » afin de garantir la « bonne » synergie entre ces éléments. Ainsi que ce soit les règles de la physique pour le processus CISPI ou les capacités physiologiques d'un humain, ces caractéristiques contraignent la définition de l'élément « Source » en interaction avec eux.

En ce sens, nous voyons dans ces travaux la possibilité de rompre avec les méthodes traditionnelles d'ingénierie consistant à répartir les fonctions de conduite de manière implicite sur la base de savoir-faire, de retours d'expériences, de coûts d'investissements ou de technologies disponibles (Galara & Hennebicq, 1999). En effet, ces caractéristiques fondées sur des propriétés mesurables permettent d'envisager la mise en place de méthodes d'évaluation basées sur des critères rationnels pour la répartition des fonctions de conduite entre des agents techniques ou humains. Nos travaux sont ainsi en phase avec la vision 2020 de l'ingénierie système par l'INCOSE (INCOSE, 2007) (AFIS, 2012) quant à l'anticipation des performances des systèmes critiques, comme les systèmes homme-machine, et la maîtrise de leur développement au plus tôt du projet, via des modèles numériques, ainsi que leur couplage à travers des techniques de co-simulation.

Conclusion et perspectives générales

Conclusion et perspectives générales :

Nous avons pris prétexte du constat à posteriori de dysfonctionnements systémiques (Boardman & Sauser, 2013b) et d'un nouveau paradigme d'Ingénierie Système Basée sur l'exécution de Modèles (Garcia, 2009) pour revisiter la nature « totalisante (holonique) » de la relation d'architecture-système (Claeys, 2013) en regard d'une situation-système visée.

Nous nous sommes plus particulièrement attaché à architecturer deux « **totalités artéfactuelles** » (*constituants de contrôle et de commande*) fonctionnalisant le comportement de conduite du procédé critique ciblé avec deux « **totalités naturelles** » (*Processus hydraulique (matière/énergie), Constituant humain de conduite*) dont on ne peut garantir que partiellement le comportement en réaction à toute décision prescrite de conduite. Cette perspective est en ligne avec celle « **système de systèmes** » qui prévaut au constat ci-dessus et manière plus générale au questionnement récurrent de la communauté d'« Ingénierie Système » depuis une vingtaine d'années, bien que notre situation d'intérêt ne soit pas organisationnelle.

La construction concourante d'une faisabilité virtuelle du système d'intérêt visé concrétise le couplage entre représentations systémiques du réel et interdisciplinaires d'ingénierie. Nos travaux, au facteur d'échelle ciblé en **partie 1**, montre l'intérêt de cette vision pour tendre vers une ingénierie centrée système. Notons que le pivot de cette construction-système reste néanmoins artéfactuel pour asseoir cette faisabilité sur la partie totalement prescriptible en regard de la partie naturelle dont nous voulons tenir compte au plus tôt de certaines contraintes sans distinguer de plus ce qui relèverait d'une totalité physique ou biologique. Des travaux devraient être menés pour comparer cette faisabilité système avec celles qui résulteraient d'autres organisations collaboratives entre parties prenantes « techniques », « physiques », « humaines », ...

Nous avons proposé en **partie 2** une heuristique interprétant la nature spécifiante et itérative du processus d'architecture-système selon l'approche des « problem-frames ». La généralisation (Figure 177) que nous pouvons faire en retour de mise en œuvre de cette heuristique montre les dimensions de connaissances collectives et individuelles (inspiré de (Wilber, 1997) du processus collaboratif étudié (Tableau 20).

System of Interest - Systemic Architecting		System of Interest - Virtual Architecting	
Whole	<u>Quadrant 1 : collective subjective specification</u> problem-oriented : $K_S, R_S \rightarrow R_H$ solution-oriented : $M_H \leftarrow R_S, K_H$	<u>Quadrant 4 : interdisciplinary subjective specification</u> problem-oriented : $K_H, R_H \rightarrow R_I$ solution-oriented : $M_I \leftarrow R_H, K_I$	
Coupling	<u>Quadrant 2: collaborative objective specification</u> situation-oriented : $K_S, M_H \vdash R_S$ system-oriented : $K_H, M_h \vdash R_H$ situation-oriented : $K_s, M_h \vdash R_s$	<u>Quadrant 5 : collaborative objective specification</u> system-oriented : $K_H, M_I \vdash R_H$ constituent-oriented : $K_I, M_p \vdash R_I$ system-oriented : $K_h, M_p \vdash R_h$	
Part	<u>Quadrant 3 : individual subjective specification</u> problem-oriented : $K_s, R_s \rightarrow R_h$ solution-oriented : $M_h \leftarrow R_s, K_h$	<u>Quadrant 6 : disciplinary subjective specification</u> problem-oriented : $K_h, R_h \rightarrow R_p$ solution-oriented : $M_p \leftarrow R_h, K_p$	

**Tableau 20 : Interprétation de l'heuristique de co-spécification système selon le modèle AQAL (All quadrants, All Level).
Inspirée de (Wilber, 1997)**

Conclusion et perspectives générales

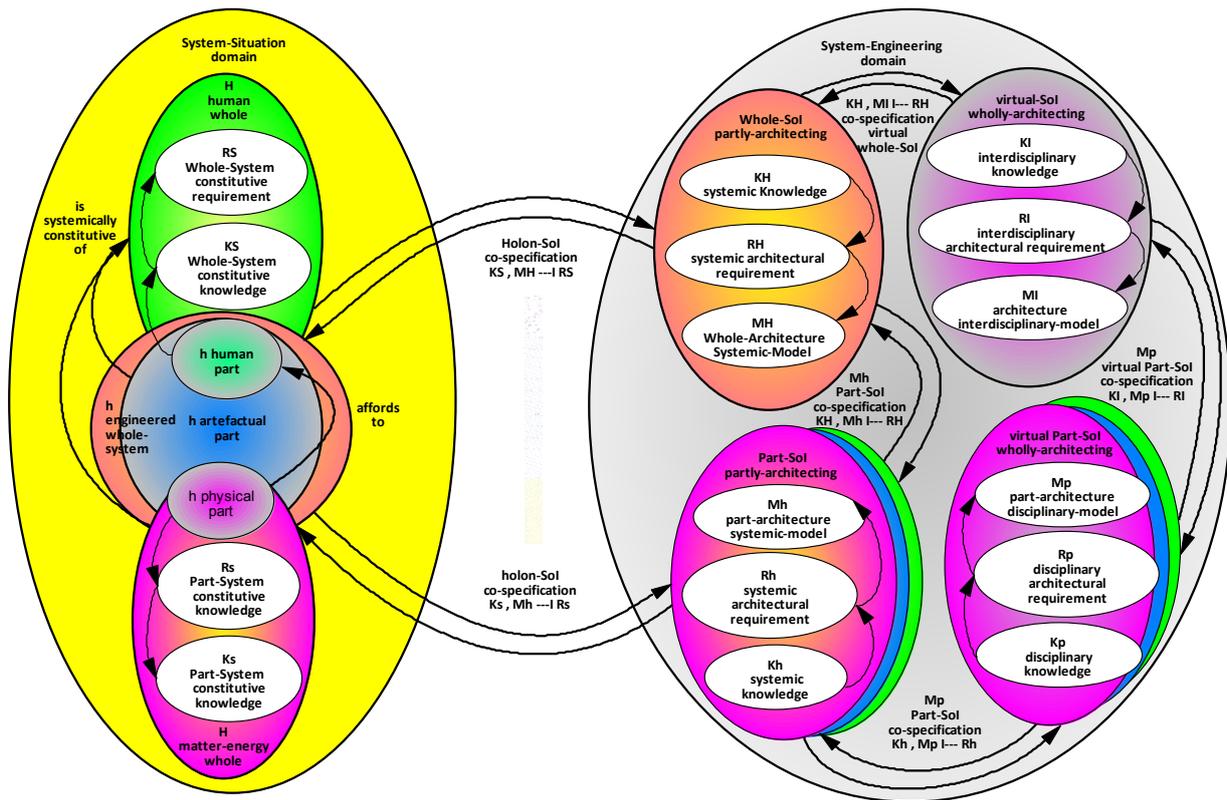


Figure 177 : Généralisation de l'heuristique de co-spécification système étudiée

La co-spécification systémique (Quadrants 1, 2 & 3) fait du « conceptagon » le patron architectural du système d'intérêt à faire pour coupler, vers une même situation, un ensemble :

- De connaissances subjectives (K_s) et (K_s) en une connaissance objective (K_H) de la totalité requise
- D'exigences optatives (R_s) et (R_s) en un ensemble d'exigences architecturales (R_H) du système d'intérêt requis
- De modèles constitutifs (M_h) en un modèle de compréhension (M_H) du système d'intérêt requis

Notons que la visée architecturale (Quadrant 2) de cette spécification systémique diffère ainsi des pratiques courantes d'abstraction pour « penser-système » (Figure 178) en objectivant au plus tôt aussi bien les parties (Quadrant 3) au regard de modèles de faisabilité disciplinaires (Quadrant 6), que la totalité visée (Quadrant 1) au regard d'un modèles de faisabilité interdisciplinaire (Quadrant 4).

La modélisation multi-physique en chapitre 5 illustre ce « feedback » afin de faciliter la notification de chaque expertise spécialiste pour représenter totalement une réalité de la matière-énergie que ne permet pas une modélisation processive plus abstraite ou discrétisée par objet. Précisons aussi que des règles pragmatiques de modélisation systémique complètent ce processus pour, par exemple, repérer l'« objet circulant » qui donne originellement vie à la mission du système d'intérêt ou pour définir la frontière entre ce qui est contrôlable intérieurement de ce qui ne l'est pas extérieurement mais qui influence son comportement total.

Conclusion et perspectives générales

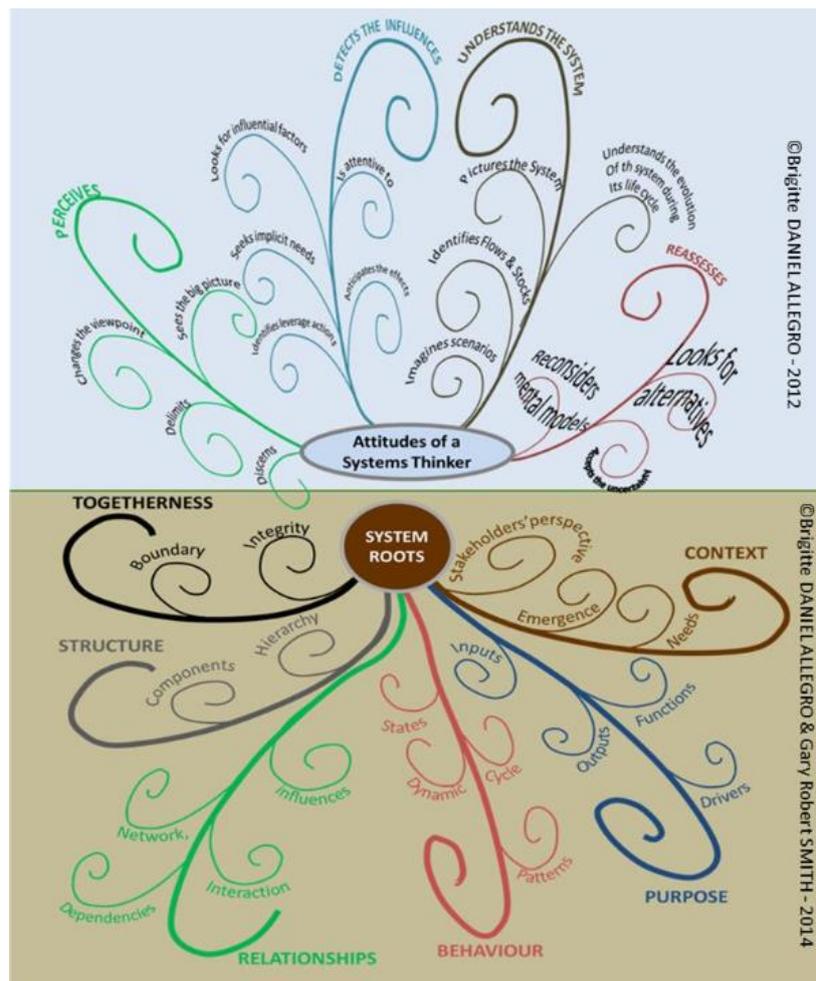


Figure 178 : The System Thinker's Tree (Smith & Daniel-Allegro, 2015)

La faisabilité sous forme virtuelle (Quadrants 4, 5 & 6) de cette co-spécification systémique cible une concrétisation concourante à la compréhension récursive du modèle du système d'intérêt (M_H). Elle s'appuie sur un patron architectural « CMMS » afin d'intégrer un ensemble :

- de connaissances disciplinaires (K_p) en une connaissance interdisciplinaire (K_i) visant objectivement (K_H)
- d'exigences réalisationnelles (R_p) en un ensemble d'exigence architecturale de faisabilité (R_h) du système d'intérêt visé
- de modèles disciplinaires exécutables (M_h) en un modèle interdisciplinaire exécutable (M_i) du système d'intérêt visé

L'ensemble des relations ($K_{source}, R_{source} \rightarrow R_{puits}$) et ($M_{puits} \leftarrow K_{puits}, R_{source}$) traduit la nature descriptive puis prescriptive de la relation de spécification entre espace-problème requérant et espace-solution délivrant menant à une solution vérifiée (M_{puits}). L'ensemble des relations ($K_{source}, M_{puits} \leftarrow R_{source}$) traduit la validation contractuelle de cette solution menant par raffinements successifs à la validation opérationnelle d'un système ingénieré ($K_{situation}, S \leftarrow R_{opérationnelle}$) de façon plus générale que dans notre expérimentation.

Il est important de remarquer que la connaissance perçue par un espace-problème pour requérir (R_{puits}) un espace-solution diffère de celle (K_{puits}) que cet espace met en œuvre pour prescrire une solution (M_{puits}). Pour faciliter cette expression de chaque connaissance experte, nos travaux ont ainsi contribué, d'un point de vue

Conclusion et perspectives générales

technique, à éprouver l'intérêt des outils collaboratifs d'échanges de modèles et de connaissances, l'usage des différents diagrammes du langage de modélisation système SysML ainsi que des outils co-simulation système pour supporter notre heuristique de co-spécification système. Le tableau 2 illustre le déploiement de l'ensemble de ces moyens pour la mise en œuvre des scénarios des **parties 3 et 4**.

System of Interest - Systemic Architecting		System of Interest - Virtual Architecting
Whole	<p><u>Problem oriented :</u></p> <ul style="list-style-type: none"> • Diagrammes d'exigences SysML / Diagrammes de cas d'utilisations SysML <p><u>Solution oriented :</u></p> <ul style="list-style-type: none"> • Plate-forme CISPI du CRAN (Chapitre 1) 	<p><u>Problem oriented :</u></p> <ul style="list-style-type: none"> • Diagrammes d'exigences SysML / Diagrammes de cas d'utilisations SysML <p><u>Solution oriented :</u></p> <ul style="list-style-type: none"> • Diagrammes Internes de Blocs (SysML) représentant les architectures interdisciplinaires de co-simulation système entre les différents modèles d'ingénierie disciplinaire (Partie 2 et Partie 3)
Coupling	<p><u>Situation & System oriented :</u></p> <ul style="list-style-type: none"> • Couplage du bus de terrain de la plate-forme CISPI avec le bus de co-simulation système via le serveur OPC (Chapitre 7) • Mise en situation opérationnelle (CISPI) de l'opérateur de conduite pour l'évaluation des paramètres influençant la détection sonore (Chapitre 8) 	<p><u>System & Component oriented :</u></p> <ul style="list-style-type: none"> • Bus de co-simulation (Cosimate) permettant d'orchestrer l'échange de données entre les différents modèles disciplinaires des ingénieries spécialistes (Partie 2 et Partie 3)
Part	<p><u>Problem oriented :</u></p> <ul style="list-style-type: none"> • Diagrammes d'exigences SysML / Diagrammes de cas d'utilisations SysML <p><u>Solution oriented :</u></p> <ul style="list-style-type: none"> • Processus hydraulique de CISPI (Vannes, Débitmètre, Cuves....) (Chapitre 7) • Opérateurs de conduite CISPI (salle de commande, terrain) (Chapitre 8) • 	<p><u>Problem oriented :</u></p> <ul style="list-style-type: none"> • Diagrammes d'exigences SysML / Diagrammes de cas d'utilisations SysML <p><u>Solution oriented :</u></p> <ul style="list-style-type: none"> • Modèle du procédé CISPI (ISO 10628) → Translation Diagrammes d'activités SysML (Chapitre 5) • Modèle du processus CISPI (Modelica) → Translation Diagrammes Internes de Blocs SysML + Diagrammes Paramétriques SysML (Chapitre 5) • Modèle de Contrôle (Simulink) → Translation Diagrammes Internes de blocs SysML / Diagrammes paramétrique SysML (Chapitre 6) • Modèle de Commande (Simulink) → Translation Diagrammes Internes de blocs SysML / Diagrammes d'états SysML (Chapitre 6) • Modèle Physiologique (Simulink) → Translation Diagrammes internes de blocs SysML / Diagrammes paramétrique SysML (Chapitre 8)

Tableau 21 : Mise en œuvre de l'heuristique de co-spécification système

D'un point de vue pédagogique, ces travaux ont permis de décliner une heuristique de co-spécification système qui constitue maintenant la base d'une démarche pour l'enseignement par projet à l'ISBM (G. Morel, et al., 2014).

Cependant malgré cet intérêt formatif, nos travaux n'en restent pas moins exploratoires et nécessitent un passage à une échelle pour une preuve de maturité supérieure à celle que nous nous sommes efforcés de mettre en œuvre lors de la définition de la plate-forme CISPI du CRAN. Cette évolution se concrétise notamment à travers la définition d'un environnement de co-spécification et de co-simulation plus mature

Conclusion et perspectives générales

prenant en compte le partage et l'exécution de modèles de manière complètement intégré. Cela va dans le sens du standard FMI (Functional Mock-up Interfaces) qui ouvre des perspectives pour l'échange de modèles et la co-simulation.

De plus, à un facteur d'échelle industriel, cet environnement de co-spécification exécutable basée sur des modèles soulève des questions relatives à la co-simulation et notamment à la configuration du bus de co-simulation ainsi que des différents outils de simulation, afin de garantir le comportement global du SYSTEME en simulation. En ce sens, la création d'un nouveau métier d'architecte simulation (Retho, 2015) en interaction avec l'ingénieur système nous apparaît nécessaire pour faire face à cette complexité. En complémentarité des travaux de (Lieber, 2013) qui prônent un architecte centré humain en pendant de l'architecte centré technique, nos travaux montrent l'intérêt de généraliser cette vision à ce qui relève du naturel (humain, matière/énergie, écologie) de façon générale.

Enfin, d'un point de vue plus général, la mise en œuvre de notre heuristique de co-spécification système requiert un changement des organisations en entreprises afin d'évoluer d'une ingénierie centrée documents vers une ingénierie SYSTEME centrée sur des modèles exécutables. Bien que cette évolution soit en marche, il reste encore un palier important à franchir pour déployer ces techniques de co-simulation d'un point de vue industriel, requérant pour chacun des projets une analyse entre les investissements pour simuler les modèles et les apports vis-à-vis des contraintes de coûts, de temps et de qualité du produit à fournir.

Pour finir, nos nombreuses interactions avec différents domaines d'ingénieries spécialistes (physique, automatisation et physiologique) nous ont permis d'obtenir des résultats prometteurs d'un point de vue de la modélisation disciplinaire selon une perspective SYSTEME, requérant cependant d'être explorés plus en détails :

- La bibliothèque Modelica développée dans le chapitre 5 pour la modélisation du procédé hydraulique de la plateforme CISPI à un niveau d'abstraction fonctionnelle nécessite d'être généralisée pour être utilisée pour des systèmes multi-physiques (Thermique, Electrique, Mécanique).
- La dynamique du paramètre F estimé en ligne par la CSM (Commande Sans Modèles) mérite d'être étudié plus en détail afin d'en extraire des informations plus précises pour l'étude de dérive et la détection de défaut du système dans la perspective de relier les sous-systèmes de conduite, de gestion technique et de maintenance composant l'architecture CMMS-IAMS retenue.
- La modélisation des interactions physico-physiologiques en puissance, dans le chapitre 8, nécessite d'être étendue à l'ensemble des capteurs sensoriels chez l'humain (odorat, vue, toucher, goût) afin de se référer à un ensemble de propriétés mesurables et homogènes quel que soit le capteur (qu'il soit technique ou humain) lors de l'évaluation des performances de ces derniers pour la répartition des fonctions de conduite d'actionnement et de mesures entre des agents techniques ou humains.

Bibliographie

- Abrial, J., & Hoare, A. (2005). *The B-book: assigning programs to meanings*. Cambridge University Press.
- AFIS - GT Ingénierie Système. (2005). Processus de l'Ingénierie Système - Qu'est ce qu'un processus ? . In: AFIS (Ed.).
- Amalberti, R. (1996). *La conduite de systèmes à risques: le travail à l'hôpital*. Presses universitaires de France.
- Andreasson, J. (2003). VehicleDynamics library. In: *Proceedings of the 3rd International Modelica Conference, Linköping*. Citeseer.
- ANSI-EIA-632. (1999). Processes for engineering a system. In. Electronic Industries Alliance, Gouvernement Electronics And Information Technolo Association Engineering Departmen, EIA Standard.
- Appell, B., & Chabert, J. (1998). Contrôle-commande des réacteurs et des usines: architecture générale. *Techniques de l'ingénieur. Génie nucléaire* (BN3411), BN3411. 3411-BN3411. 3422.
- Appell, B., & Chambon, Y. (1998). Procédures de conduite et interface homme-machine. *Techniques de l'ingénieur. Génie nucléaire* (BN3421), 1-12.
- Artman, H., & Garbis, C. (1998). Team communication and coordination as distributed cognition. In: *9th Conference of Cognitive Ergonomics* (pp. 151-156), pp. 151-156.
- Auzelle, J. (2009). *Proposition d'un cadre de modélisation multi-échelles d'un système d'information en entreprise centré sur le produit*. Université Henri Poincaré-Nancy I.
- Bañina, S. (2006). *Interopérabilité dirigée par les modèles : Une Approche Orientée Produit pour l'interopérabilité des systèmes d'entreprise*. Université Henri Poincaré-Nancy I.
- Bajic, E. (2005). Ambient services modelling framework for intelligent products. *Smart Object Systems, UbiComp*, 83-90.
- Bear, M., Paradiso, M., Connors, B., & Neuroscience, M. (1996). Exploring the brain. *Neuroscience: Williams & Wilkins*.
- Belhumeur, A. (1989). *Contribution à l'étude d'une méthode de conception des automatismes des systèmes de conduite des processus industriels*. Lille 1.
- Bellifemine, F., Poggi, A., & Rimassa, G. (1999). JADE—A FIPA-compliant agent framework. In: *Proceedings of PAAM* (Vol. 99, pp. 33). London, pp. 33.
- Bennani, O., Chauvet, G., Chauvet, P., Dupont, J., & Jouen, F. (2009). A hierarchical modeling approach of hippocampus local circuit. *Journal of integrative neuroscience*, 8 (01), 49-76.
- Bennani, O., Chauvet, P., & Dupont, J. (2010). The Mathematical Theory of Integrative Physiology: Application to hippocampus for drug discovery. In: *Bio-Inspired Computing: Theories and Applications (BIC-TA), 2010 IEEE Fifth International Conference on* (pp. 1406-1416). IEEE, pp. 1406-1416.
- Berthoz, A. (1997). *Sens du mouvement (Le)*. Odile Jacob.
- Berthoz, A. (2009). *Simplexité (La)*. Odile Jacob.
- Berthoz, A. (2014). Simplexity: Biologically Inspired Principles For Complex Systems ? Paper presented at the CSD&M 2014 (Complex Systems Design & Management), Paris.
- Bertsch, C., & Schulmeister, E. (2014). The Functional Mockup Interface-seen from an industrial perspective. In: *10th International Modelica Conference, Lund, Sweden*.
- Birraux, C., Bataille, C., & Sido, B. (2011). Rapport de la mission parlementaire sur la sécurité nucléaire, la place de la filière et son avenir. In: *Vol. N°3614 (Assemblée) et N°701 (Sénat)*. Assemblée nationale, Sénat.
- Bjelkemyr, M., & Lindberg, B. (2007). The Effects of Limits to Human Abilities on System of Systems Properties. In: *The 7th International Conference on Complex Systems October*.
- Bjørner, D. (2008). From Domain to Requirements. *Concurrency, Graphs and Models*, 278-300.
- Bjørner, D. (2009). From Domains to Requirements. On a Triptych of Software Development.
- Bjørner, D., & Henson, M. (2007). *Logics of specification languages*. Springer Science & Business Media.
- Bleicher, A. (2014). Le mélange ses sens. *Cerveau & Psycho*, 61.
- Blochowitz, T., Otter, M., Åkesson, J., Arnold, M., Clauss, C., Elmqvist, H., Friedrich, M., Junghanns, A., Mauss, J., & Neumerkel, D. (2012). Functional mockup interface 2.0 : The standard for tool independent exchange of simulation models. In: *9th International Modelica Conference*.
- Boardman, J., & Sauser, B. (2006). Systemics : In Search of the System Genome.
- Boardman, J., & Sauser, B. (2008). *Systems thinking: Coping with 21st century problems*. CRC Press.
- Boardman, J., & Sauser, B. (2013a). *Systemic thinking : building maps for worlds of systems*. John Wiley & Sons.
- Boardman, J., & Sauser, B. (2013b). *Systemic thinking: building maps for worlds of systems*. John Wiley & Sons.
- Boardman, J., Sauser, B., John, L., & Edson, R. (2009). The conceptagon: A framework for systems thinking and systems practice. In: *Systems, Man and Cybernetics, 2009. SMC 2009. IEEE International Conference on* (pp. 3299-3304). IEEE, pp. 3299-3304.
- Boardman, J., Sauser, B., & Verma, D. (2009). In Search of Systems "DNA. *Journal of Computers*, 4 (10), 1043-1052.
- Boehm, B. W. (1988). A spiral model of software development and enhancement. *Computer*, 21 (5), 61-72.
- Boes, J. (2014). *Apprentissage du contrôle de systèmes complexes par l'auto-organisation coopérative d'un système multi-agent : application à la calibration de moteurs à combustion*. Université de Toulouse, Université Toulouse III-Paul Sabatier.

Bibliographie

- Bouffaron, F. (2014). Co-Spécification exécutable basée sur des modèles : application à la conduite d'un procédé industriel
In: *IBM Symposium Système 2014*, Paris.
- Bouffaron, F., Dupont, J., Mayer, F., & Morel, G. (2014). Integrative construct for Model-Based Human-System Integration: a case study. Paper presented at the World Ifac Congress 2014, Cape Town - South Africa.
- Bouffaron, F., Gouyon, D., Dobre, D., & Morel, G. (2012). Revisiting the interoperation relationships between Systems Engineering collaborative processes. Paper presented at the INCOM 2012, 14th IFAC Symposium on Information Control Problems in Manufacturing, Bucharest, Romania.
- Bouffaron, F., Marange, P., & Morel, G. (2014). Checking models based on an iterative co-specification process of a critical system. Paper presented at the INDIN (Internation Conference On Industrial Informatics) Porto Alegre, Brazil.
- Boy, G. (2005). Human-centered design: The AUTOS pyramid. *EURISCO International Newsletter*, 4.
- Boy, G. (2011). *The handbook of human-machine interaction: a human-centered design approach*. Ashgate Publishing.
- Boy, G. A., & Narkevicius, J. M. (2014). Unifying human centered design and systems engineering for human systems integration. In: *Complex Systems Design & Management* (pp. 151-162). Springer, pp. 151-162.
- Carot, S. (1994). *La cristallisation en chimie fine : optimisation des paramètres de régulation de température et application à l'élaboration de principes actifs de médicaments*.
- Cassandras, C., & Braatz, R. (2011). People In Control. *IEEE Control Systems Magazine*, 31 (6), 24.
- Cassandras, C., & Lafortune, S. (1999). *Introduction to discrete event systems*. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht.
- Cellier, F., & Nebot, À. (2005). The Modelica bond graph library. In: *the 4th International Modelica Conference*.
- Chauvet, G. (1993). Hierarchical functional organization of formal biological systems: a dynamical approach. III. The concept of non-locality leads to a field theory describing the dynamics at each level of organization of the (D-FBS) sub-system. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London B: Biological Sciences*, 339 (1290), 463-481.
- Chauvet, G. (1995). *La vie dans la matière: le rôle de l'espace en biologie*. Flammarion [Paris].
- Chauvet, G. (2002). On the mathematical integration of the nervous tissue based on the S-propagator formalism I: Theory. *Journal of integrative neuroscience*, 1 (01), 31-68.
- Claeys, D. (2013). *Architecture et complexité: Un modèle systémique du processus de (co) conception qui vise l'architecture*. Université de Louvain.
- Clanché, F., Gouyon, D., Dobre, D., Pétin, J. F., & Morel, G. (2010). Plate-forme pour la conduite interactive et sûre.
- Cloutier, R. (2006). *Applicability of patterns to architecting complex systems*. Stevens Institute of Technology.
- Cloutier, R., & Bone, M. (2010). Compilation of SysML RFI—Final Report. *Stevens Institute of Technology*.
- Cloutier, R., Sauser, B., Bone, M., & Taylor, A. (2015). Transitioning Systems Thinking to Model-Based Systems Engineering: Systemigrams to SysML Models. *Systems, Man, and Cybernetics: Systems, IEEE Transactions on*, 45 (4), 662-674.
- Coppolani, P. (2004). *La chaudière des réacteurs à eau sous pression*. EDP sciences.
- Cott, B., & Macchietto, S. (1989). Temperature control of exothermic batch reactors using generic model control. *Industrial & engineering chemistry research*, 28 (8), 1177-1184.
- Cressent, R., Idasiak, V., & Kratz, F. (2011). Intégration des analyses de sûreté de fonctionnement dans le processus de conception système. In: *4èmes Journées Doctorales/Journées Nationales MACS* (pp. Intégration des analyses de sûreté de fonctionnement dans le processus de conception système), pp. Intégration des analyses de sûreté de fonctionnement dans le processus de conception système.
- Czarnecki, K. (1998). *Generative programming: Principles and techniques of software engineering based on automated configuration and fragment-based component models*. Unpublished PhD thesis, Technical University Of Ilmenau.
- De Miras, J., Riachy, S., Fliess, M., Join, C., & Bonnet, S. (2012). Vers une commande sans modèle d'un palier magnétique. In: *7e Conférence Internationale Francophone d'Automatique (CIFA)* (pp. CDROM), pp. CDROM.
- Després, F. (1991). *Automatisation des systèmes de production - du besoin à l'utilisation* (KIRK edition ed.).
- Devic, C. (2014). CONNEXION COntrôle Commande Nucléaire Numérique pour l'EXport et la rénoVatIOn - De la schématique proressive à la centrale numérique au service de la productivité des études. *Génie Logiciel*, N° 109, 2-11.
- Devic, C., & Morilhat, P. (2013). CONNEXION COntrôle Commande Nucléaire Numérique pour l'EXport et la rénoVatIOn - Coupler génie logiciel et ingénierie système : source d'innovations. *Génie Logiciel*, N° 104, 2-11.
- Dobre, D. (2010). *Contribution à la modélisation d'un système interactif d'aide à la conduite d'un procédé industriel*. Unpublished PhD Thesis, Université Henri Poincaré, Nancy I, Nancy
- Duco, J. (2004). Accidents nucléaires. Three Mile Island (Etats-Unis). *Techniques de l'ingénieur. Génie nucléaire* (BN3883), BN3883-3881.
- Ducroq, A. (1996). Concept of semantial and phenomenon of emergence. *Proceedings of ECHO symposium*.
- Dulmet, M., & Lhote, F. (2001). Analyse et caractérisation des couplages entre processus dans les systèmes de production. *Journal européen des systèmes automatisés*, 35 (10), 1193-1214.
- Dupont, J., Lieber, R., Morel, G., Méry, D., & Bouffaron, F. (2012). Spécification d'un Processus Technico-Physiologique de Perception de Fermeture et Verrouillage d'un capot moteur en situation de maintenance aéronautique. In: Airbus - CRAN - LORIA.
- Endsley, M. (1995). Toward a theory of situation awareness in dynamic systems. *Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society*, 37 (1), 32-64.
- Esteban, P., Pascal, J., & Esteve, D. (2009). Une méthodologie de Conception Produit basée sur la norme EIA-632. *Congrès de Génie Industriel, (CIGI'2009)*.
- Estefan, J. (2007). Survey of model-based systems engineering (MBSE) methodologies. *Incose MBSE Focus Group*, 25, 8.

Bibliographie

- Faisandier, A. (2014). *Notions de système et d'ingénierie de système* (Vol. 1). Sinergy'Com.
- Feliot, C. (1997). *Modélisation de systèmes complexes: intégration et formalisation de modèles*.
- Fiorèse, S., & Meinadier, J. (2012). *Découvrir et comprendre l'Ingénierie Système* Cépaduès.
- Fliess, M., Abouaïssa, H., Iordanova, V., & Join, C. (2012). La commande << sans modèle >> du trafic autoroutier. *FLASH X--La revue scientifique de l'Ecole polytechnique* (14), 25-28.
- Fliess, M., & Join, C. (2013). Model-free control. *International Journal of Control*, 86 (12), 2228-2252.
- Forsberg, K., & Mooz, H. (1995). Application of the "Vee" to incremental and evolutionary development. *Systems Engineering in the Global Market Place*, 801-808.
- Frachet, J. (1987). *Une introduction au génie automatique: faisabilité d'une chaîne d'outils CAO pour la conception et l'exploitation des machines automatiques industrielles*. Université Henri Poincaré, Nancy I, France.
- Friedenthal, S., Moore, A., & Steiner, R. (2008). *A Practical Guide to SysML: Systems Model Language*. Morgan Kaufmann.
- Fritzson, P., Aronsson, P., Bunus, P., Engelson, V., Saldamli, L., Johansson, H., & Karstöm, A. (2002). The open source Modelica project. In: *The 2th International Modelica Conference* (pp. 18-19), pp. 18-19.
- Fusaoka, A., Seki, H., & Takahashi, K. (1983). A description and reasoning of plant controllers in temporal logic. In: *International Joint Conference on Artificial Intelligence* (Vol. 8-12/09, pp. 405-408), Karlsruhe, pp. 405-408.
- Gaaloul, S. (2012). *Interopérabilité sur les standards Modelica et composant logiciel pour la simulation énergétique des systèmes de bâtiment*. Université de Grenoble.
- Galara, D. (1986). Elaboration d'informations crédibles pour les systèmes de contrôle-commande industriels : les modules fonctionnels d'automatismes. In: EDF/DER, R. I. Chatou.
- Galara, D. (2006). Roadmap to master the complexity of process operation to help operators improve safety, productivity and reduce environmental impact. *Annual Reviews in Control*, 30 (2), 215-222.
- Galara, D. (2011). Vers un langage de représentation des schémas mentaux des exploitants de systèmes de production complexes et à risques. *Génie Logiciel*, 96.
- Galara, D., & Hennebicq, J. (1999). Process control engineering trends. *Annual Reviews in Control*, 23, 1-11.
- Gamma, E., Helm, R., Johnson, R., & Vlissides, J. (1994). *Design patterns: elements of reusable object-oriented software*. Pearson Education.
- Garcia, J. (2009). Executable and Integrative Whole-System Modeling via the Application of OpEMCSS and Holons for Model-based Systems Engineering. *INSIGHT*, 12 (4), 21-23.
- Garro, A., & Tundis, A. (2014). RAMSAS4Modelica: a Simulation-driven Method for System Dependability Analysis centered on the Modelica language and related tools. In: *Proceedings of the Symposium on Theory of Modeling & Simulation-DEVS Integrative* (pp. 29). Society for Computer Simulation International, pp. 29.
- Gazzaniga, M., Ivry, R., & Mangun, G. (2000). *Neurosciences cognitives: la biologie de l'esprit*. De Boeck Supérieur.
- Gibson, J. (1977). The theory of affordances. *Hilldale, USA*.
- Gibson, J. (2014). *The Ecological Approach to Visual Perception: Classic Edition*. Psychology Press.
- Goldstein, E. (2009). *Encyclopedia of perception*. Sage Publications.
- Gotel, O., & Finkelstein, C. (1994). An analysis of the requirements traceability problem. In: (pp. 94-101), pp. 94-101.
- Gouyon, D., Bouffaron, F., & Morel, G. (2014). Specifying Some Key SE Training Artifacts. In: *Complex Systems Design & Management* (pp. 207-218). Springer, pp. 207-218.
- Gunter, C., Gunter, E., Jackson, M., & Zave, P. (2000). A reference model for requirements and specifications. *Software, IEEE*, 17 (3), 37-43.
- Halbwachs, N., Caspi, P., Raymond, P., & Pilaud, D. (1991). The synchronous data flow programming language LUSTRE. *Proceedings of the IEEE*, 79 (9), 1305-1320.
- Hall, J., Jackson, M., Laney, R., Nuseibeh, B., & Rapanotti, L. (2002). Relating software requirements and architectures using problem frames. In: *the IEEE Joint International Conference on Requirements Engineering* (pp. 137-144), Essen, Germany, pp. 137-144.
- Hall, J., & Rapanotti, L. (2005). Problem frames for sociotechnical systems. *Requirements Engineering for Sociotechnical Systems*, 318-339.
- Hamdan, M., & Gao, Z. (2000). A novel PID controller for pneumatic proportional valves with hysteresis. In: *Industry Applications Conference, 2000. Conference Record of the 2000 IEEE* (Vol. 2, pp. 1198-1201). IEEE, pp. 1198-1201.
- Hartson, R. (2003). Cognitive, physical, sensory, and functional affordances in interaction design. *Behaviour & Information Technology*, 22 (5), 315-338.
- Herzog, E. (2004). *An approach to Systems Engineering tool data representation and exchange*. Unpublished PhD thesis, Linköping University.
- Hollnagel, E. (2006). Resilience: the challenge of the unstable. *Resilience Engineering-Concepts and Precepts*, 9-17.
- Hollnagel, E., & Woods, D. (2005). *Joint cognitive systems: Foundations of cognitive systems engineering*. CRC Press.
- Hopcroft, J. (1979). *Introduction to automata theory, languages, and computation*. Pearson Education India.
- Houmb, S., Islam, S., Knauss, E., Jürjens, J., & Schneider, K. (2010). Eliciting security requirements and tracing them to design: an integration of Common Criteria, heuristics, and UMLsec. *Requirements engineering*, 15 (1), 63-93.
- IEEE 1220. (2005). IEEE Standard for Application and Management of the Systems Engineering Process. In: IEEE Computer Society.
- INCOSE. (2007). *Systems Engineering Vision 2020*. In: INCOSE.
- INCOSE. (2010). *Systems Engineering Handbook : a guide for system life cycle processes and activities (v 3.2)* (Vol. 3.2).

Bibliographie

- ISO 10628. (2014). Schémas de procédé pour l'industrie chimique et pétrochimique - Partie 1 : Spécification des schémas du procédé. In: ISO (International Standardization Orgnaism).
- ISO/IEC 15288. (2008). *ISO/IEC 15288 : Systems and software engineering - System life cycle processes*. International Organisation for Standardization.
- lung, B. (1992). *Contribution à une intelligence distribuée dans les équipements de niveau zero des processus industriels complexes*.
- Jackson, M. (1995). *Software Requirements and Specifications: A Lexicon of Practice, Principles and Prejudices* (Vol. 8). ACM Press Wokingham.
- Jackson, M. (1997). The meaning of requirements. *Annals of Software Engineering*, 3 (1), 5-21.
- Jackson, M. (2001). *Problem frames: analysing and structuring software development problems*. Addison-Wesley.
- Jackson, M., & Zave, P. (1995). Deriving specifications from requirements: an example.
- Jacquemin, D. (2013). Les accidents de fusion du coeur des réacteurs nucléaires de puissance. In: *Collection sciences et techniques*. IRSN.
- Javaux, D., & De Keyser, V. (1997). Complexity and its certification in aeronautics. In: *Systems, Man, and Cybernetics, 1997. Computational Cybernetics and Simulation., 1997 IEEE International Conference on* (Vol. 3, pp. 2120-2124). IEEE, pp. 2120-2124.
- Jin, Z. (2006). Revisiting the meaning of requirements. *Journal of computer science and technology*, 21 (1), 32-40.
- Johnson, T., Kerzhner, A., Paredis, C., & Burkhart, R. (2012). Integrating models and simulations of continuous dynamics into SysML. *Journal of Computing and Information Science in Engineering*, 12 (1), 011002.
- Join, C. (2012). *Une approche algébrique pour la pratique de l'estimation, du diagnostic, de la commande et de la finance*. Université de Lorraine.
- Join, C., Fliess, M. (2014). Développements industriels autour du concept de commande des systèmes sans modèle à priori. *Présentation Forum Académie/Entreprise de la Fédération Charles Hermite*
- Join, C., Masse, J., & Fliess, M. (2008). Etude préliminaire d'une commande sans modèle pour papillon de moteur.... A model-free control for an engine throttle: a preliminary study. *Journal européen des systèmes automatisés*, 42 (2-3), 337--354.
- Join, C., Robert, G., & Fliess, M. (2010). Model-free based water level control for hydroelectric power plants. In: *IFAC conference on control methodologies and technologies for energy efficiency, CMTEE*.
- Kerkar, N., & Paulin, P. (2012). *Exploitation des coeurs REP*. EDP Sciences.
- Kintzig, C., Poulain, G., Privat, G., & Favennec, P. (2002). *Objets communicants*. Hermes Science Publications.
- Kleiner, S., & Kramer, C. (2013). Model based design with systems engineering based on RFLP using V6. In: *Smart Product Engineering* (pp. 93-102). Springer, pp. 93-102.
- Koestler, A. (1967). *The ghost in the machine*. 1967. London: Hutchinson.
- Krob, D. (2009). Eléments d'architecture des systèmes complexes. *Gestion de la complexité et de l'information dans les grands systèmes critiques*, 179-207.
- Krob, D. (2012). Eléments de systématique-Architecture de systèmes. *Complexité-Simplexité, Editions Odile Jacob*.
- Kroes, P., Franssen, M., Poel, I., & Ottens, M. (2006). Treating socio-technical systems as engineering systems: some conceptual problems. *Systems research and behavioral science*, 23 (6), 803-814.
- Kuras, M. (2006). A Multi Scale Definition of a System. *MT Report, ed.(Bedford, MA: The MITRE Corp.), Report MTR 06B0000060, August, www.mitre.org*.
- Lamboley, P. (2001). *Proposition d'une méthode formelle d'automatisation de systèmes de production à l'aide de la méthode B*. Unpublished PhD thesis, Nancy University.
- Lawson, H. (2010). *A journey through the systems landscape*. College Publications.
- Lawson, H., Wade, J., & Hofkirchner, W. (2005-2014). Systems Science, Systems Thinking, Systems Engineering and Software Engineering. In: *Systems series published books, http://www.collegepublications.co.uk/systems/syt/*.
- Le Gallou, F., & Bouchon-Meunier, B. (1992). *Systémique : théorie et applications*. Lavoisier-Tec & Doc.
- Le Moigne, J. (1990). *La modélisation des systèmes complexes* (Vol. 2). Dunod Paris.
- Le Moigne, J. (1994). *La théorie du système général: théorie de la modélisation*. jeanlouis le moigne-ae mcx.
- Le Put, A., & Meinadier, J. (2009). Référentiel Ingénierie Système AFIS. Paper presented at the 5 ème conférence annuelle d'ingénierie système, Paris.
- Leger, J. (1999). *Contribution méthodologique à la maintenance prévisionnelle des systèmes industriels de production: proposition d'un cadre formel de modélisation*.
- Lhoste, P. (1985). *Exploitation des systèmes automatisés, EX. A. O. : proposition d'une approche méthodologique et d'outils d'assistance*. Henri Poincaré.
- Lhoste, P. (1994). Contribution au Génie Automatique : Concepts, Modèles, Méthodes et Outils. In.
- Lieber, R. (2013). *Spécification d'exigences physico-physiologiques en ingénierie d'un système support de maintenance aéronautique*. Université de Lorraine.
- Lieber, R., Dupont, J., Bouffaron, F., & Morel, G. (2013). Improving physical-physiological interaction requirements for maintenance enabling systems specification. In: *12th IFAC/IFIP/IFORS/IEA Symposium on Analysis, Design, and Evaluation of Human-Machine Systems*.

Bibliographie

- Liu, Y. (2002). *Contribution à l'automatisation des systèmes intégrés et à l'intelligence distribuée de Contrôle, Maintenance et Gestion Technique (ICMMS) pour les centrales hydroélectriques.*, Université Henri Poincaré (Nancy) - Université de HUST (Pekin).
- Lo, M. (2013). *Contribution à l'évaluation d'architectures en Ingénierie Système: application en conception de systèmes mécatroniques.* Université Montpellier II-Sciences et Techniques du Languedoc.
- Mankins, J. (1995). Technology readiness levels. *White Paper, April*, 6.
- Mateják, M., Kulhánek, T., Šilar, J., Privitzer, P., Ježek, F., & Kofránek, J. (2014). Physiobrary-modelica library for physiology. In: *10th International Modelica Conference* (pp. 499-505). Linköping University Electronic Press Lund, Sweden, pp. 499-505.
- Mayer, F. (1995). *Contribution au Génie Productique: application à l'Ingénierie Pédagogique en Atelier Inter-établissements de Productique Lorrain.*
- Medjaher, K. (2005). *Contribution de l'outil bond graph pour la conception de systèmes de supervision des processus industriels.* Lille 1.
- Michel, L., Join, C., Fliess, M., Sicard, P., & Chériti, A. (2010). Model-free control of dc/dc converters. In: *Control and Modeling for Power Electronics (COMPEL), 2010 IEEE 12th Workshop on* (pp. 1-8). IEEE, pp. 1-8.
- Micouin, P. (2011). Exigences en ingénierie systèmes basée modèles. In: *9 ième Congrès International de Génie Industriel*, Saint Sauveur, Quebec, Canada.
- Millot, P. (2014). *Designing Human-machine Cooperation Systems.* John Wiley & Sons.
- Millot, P., Debernard, S., & Vanderhaegen, F. (2011). Authority and cooperation between humans and machines. *Handbook for Human-Machine Interaction.* Ashgate Publishing Ltd, Wey Court East, Union Road, Farnham, Surrey, GU9 7PT, England.
- Modelica. (2008). The Modelica Standard Library. Online, URL: <http://www.modelica.org/libraries/Modelica>.
- Modelica. (2012). Modelica - A Unified Object-Oriented Language for Physical Systems Modeling: Language Specification Version 3.3. In.
- Morel, G. (1999). Contribution à la simulation des parties opératives interopérables pour la validation d'automatismes distribués. In. Université Henri Poincaré.
- Morel, G., Bouffaron, F., Nartz, O., Mayer, F., Marangé, P., Levrat, E., & Panetto, H. (2014). Vers un apprentissage itératif à l'ingénierie système basée sur des modèles. In: *10ème Conférence Francophone de Modélisation, Optimisation et Simulation, MOSIM'14.*
- Morel, G., Dupont, J., Lieber, R., Bouffaron, F., Mery, D., Mayer, F., & Marty, J. (2013). Spécification d'exigences physico-physiologiques d'interaction homme-machine en ingénierie système. *Génie Logiciel* (104), 29-39.
- Morel, G., & Grabot, B. (2003). Editorial of special issue. *Engineering applications of artificial intelligence*, 16 (4), 271-275.
- Morel, G., Panetto, H., Zaremba, M., & Mayer, F. (2003). Manufacturing enterprise control and management system engineering: paradigms and open issues. *Annual Reviews in Control*, 27 (2), 199-209.
- Morel, G., Valckenaers, P., Faure, J., Pereira, C., & Diedrich, C. (2007). Manufacturing plant control challenges and issues. *Control Engineering Practice*, 15 (11), 1321-1331.
- Morel, J. (1992). *Surveillance vibratoire et maintenance prédictive.* Ed. Techniques Ingénieur.
- Morin, E. (1980). *La méthode, tome 2. La Vie de la Vie* (Vol. 4).
- Müller, G., & Möser, M. (2012). *Handbook of engineering acoustics.* Springer Science & Business Media.
- NASA. (2007). *NASA Systems Engineering Handbook (NASA/Sp-2007-6105 Rev1).* US National Aeronautics & Space Administration.
- Nasri, M., Nezamabadi-Pour, H., & Maghfoori, M. (2007). A PSO-based optimum design of PID controller for a linear brushless DC motor. *World Academy of Science, Engineering and Technology*, 26 (40), 211-215.
- Neunreuther, E. (1998). *Contribution à la modélisation des Systèmes Intégrés de Production à Intelligence Distribuée: application à la distribution du contrôle et de la gestion technique sur les équipements de terrain.*
- Neyns, V. (2011). *Les modalités du contrôle cognitif en situation dynamique: anticipation et gestion des dérives. Le cas de l'anesthésie.* Université Toulouse le Mirail-Toulouse II.
- NF EN 60848. (2002). Langage de spécification GRAFCET pour diagrammes fonctionnels en séquence. In.
- NF S32 001. (1975). Signal sonore d'évacuation d'urgence. In. AFNOR.
- Norman, D. (1986). Cognitive engineering. *User centered system design: New perspectives on human-computer interaction*, 3161.
- Nugent, P., & Collar, E. (2015). The Hidden Perils of Addressing Complexity with Formal Process - A Philosophical and Empirical Analysis. In: Boulanger, F., Krob, D., Morel, G. & Roussel, J.-C. (Eds.), *Complex Systems Design & Management* (pp. 119-131). Springer International Publishing, pp. 119-131.
- OMG. *Systems Modeling Language (OMG SysML™), V1. 0.*
- OMG. (2010). *OMG Systems Modeling Language (OMG SysML) (v 1.2).*
- OMG. (2012a). *OMG Systems Modeling Language (OMG SysML) (v 1.3).*
- OMG. (2012b). SysML-Modelica transformation specification - v1.0. In. OMG.
- Otter, M., Árzén, K., & Dressler, I. (2005). StateGraph—a Modelica library for hierarchical state machines. In: *the 4th international Modelica conference* (pp. 569-578), pp. 569-578.

Bibliographie

- Palaci, F. (2009). Les agents de terrain du nucléaire : comprendre leur activité pour contribuer à la conception d'un outil d'aide informatique. In: *Mémoire de Master Professionnel d'ergonomie*. Conservatoire National des Arts et Métiers Paris.
- Panetto, H. (1991). *Une contribution au génie automatique: le prototypage des machines et systèmes automatisés de production*. Université Henri Poincaré-Nancy I.
- Paynter, H. (1961). *Analysis and design of engineering systems*. MIT press.
- Penalva, J. (1997). *La modélisation par les systèmes en situation complexes*.
- Peterson, J. (1981). Petri net theory and the modeling of systems.
- Pétin, J. (1995). *Contribution méthodologique à l'Actionnement et la Mesure Intelligents: Application au projet ESPRIT III- PRIAM nR 6188*. Université Henri Poincaré, Nancy I, Nancy.
- Pétin, J. (2007). *Méthodes et modèles pour un processus sûr d'automatisation*. Université Henri Poincaré-Nancy I.
- Pétin, J., lung, B., & Morel, G. (1998). Distributed intelligent actuation and measurement (IAM) system within an integrated shop-floor organisation. *Computers in Industry*, 37 (3), 197-211.
- Pétin, J., Morel, G., & Panetto, H. (2006). Formal specification method for systems automation. *European journal of control*, 12 (2), 115-130.
- Pouvreau, D. (2013). *Une histoire de la " systémologie générale" de Ludwig von Bertalanffy-Généalogie, genèse, actualisation et postérité d'un projet herméneutique*. Ecole des Hautes Etudes en Sciences Sociales (EHESS).
- Prouillac, M., Lerat, & Janior. (1981). Prise en compte de la fiabilité humaine dans la conception des centrales nucléaires. *Revue générale de l'électricité*, Numéro 5 - La fiabilité humaine, 434-440.
- PTA. (1987). PTA (Poste de Travail Pour l'Automatisation) - Synthèse MRES, RNUR, MICHELIN, ADEPA, PSA, SGN-ISMCM, LACN, LAG, LAMM.
- Pyster, A., Olwell, D., Hutchison, N., Enck, S., Anthony, D., Squires, H., & Squires, A. (2012). Guide to the Systems Engineering Body of Knowledge (SEBoK). Version 1.0.1. Hoboken, NJ: *The Trustees of the Stevens Institute of Technology* ©2012. Available at: http://www.sebokwiki.org/index.php/article_title.
- Qamar, A., During, C., & Wikander, J. (2009). Designing mechatronic systems, a model-based perspective, an attempt to achieve sysml-matlab/simulink model integration. In: *Advanced Intelligent Mechatronics, 2009. AIM 2009. IEEE/ASME International Conference on* (pp. 1306-1311). IEEE, pp. 1306-1311.
- Rahman, M., Nor, N., & Mizukawa, M. (2012). Evaluation for SysML-based design and analysis models using PCE. In: *Control System, Computing and Engineering (ICCSCE), 2012 IEEE International Conference on* (pp. 339-344). IEEE, pp. 339-344.
- Ramos, A., Ferreira, J., & Barceló, J. (2012). Model-based systems engineering: An emerging approach for modern systems. *Systems, Man, and Cybernetics, Part C: Applications and Reviews, IEEE Transactions on*, 42 (1), 101-111.
- Ranky, P. (1986). *Computer integrated manufacturing*. Prentice-Hall, Inc.
- Rao, M., & Wang, Q. (1993). Computer integrated process systems in continuous manufacturing industries. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 6 (4), 260-272.
- Rasmussen, J. (1986). *Information Processing and Human-Machine Interaction. An Approach to Cognitive Engineering* (Vol. 12).
- Renier, R., & Chenouard, R. (2011). De SysML à Modelica aide à la formalisation de modèles de simulation en conception préliminaire. In: *12ème Colloque National AIP PRIMECA*.
- Retho, F. (2015). *Méthodologie collaborative d'aide à la construction de produits virtuels pour la conception d'aéronefs à propulsion électrique*. Supelec.
- Richard, J. (1990). *Les activités mentales: comprendre, raisonner, trouver des solutions*. A. Colin.
- Rochet, S. (2007). Formalisation des Processus de l'Ingénierie Système: Proposition d'une méthode d'adaptation des processus génériques à différents contextes d'application.
- Roques, P. (2011). *SysML par l'exemple-Un langage de modélisation pour systèmes complexes*. Editions Eyrolles.
- Royce, W. (1970). Managing the development of large software systems. In: *IEEE WESCON* (Vol. 26, pp. 328-388). Los Angeles, pp. 328-388.
- Salmon, P., Stanton, N., Walker, G., Baber, C., Jenkins, D., McMaster, R., & Young, M. (2008). What really is going on? Review of situation awareness models for individuals and teams. *Theoretical Issues in Ergonomics Science*, 9 (4), 297-323.
- Salmon, P., Stanton, N., Walker, G., & Jenkins, D. (2009). Distributed situation awareness. *Theory Measurement and Application to Teamwork*. Farnham: Ashgate.
- Sannier, N., & Baudry, B. (2011). Défis pour la variabilité et la traçabilité des exigences en ingénierie système. In: *INFORSID 2011*.
- Sauser, B., Ramirez-Marquez, J., Verma, D., & Gove, R. (2006). Determining system interoperability using an integration readiness level. *Stevens Institute of Technology*, 21.
- Schmidt, R. (1999). *Physiologie*. De Boeck Supérieur.
- Simão, J., & Stadzisz, P. (2009). Inference based on notifications: a holonic metamodel applied to control issues. *Systems, Man and Cybernetics, Part A: Systems and Humans, IEEE Transactions on*, 39 (1), 238-250.
- Sindico, A., Di Natale, M., & Panci, G. (2011). Integrating SysML with Simulink using Open-source Model Transformations. In: *SIMULTECH* (pp. 45-56), pp. 45-56.

Bibliographie

- Smith, G., & Daniel-Allegro, B. (2015). Mind mapping systems thinker's attitude facing a sepsis problem. Paper presented at the ISSS2015 (9th Meeting of the ISSS) overning the Antropocene Berlin.
- Staal, M. (2004). Stress, cognition, and human performance: A literature review and conceptual framework. *NaSA technical memorandum*, 212824, 9.
- Suied, C. (2007). *De l'urgence perçue au temps de réaction: application aux alarmes sonores*. Paris 6.
- Taguchi, G. (1987). System of experimental design; engineering methods to optimize quality and minimize costs. In.
- Tarride, B. (2013). *Physique, fonctionnement et sûreté des REP: Maîtrise des situations accidentelles du système réacteur*. EDP sciences.
- Tixador, J. (1989). *Une contribution au genie automatique: la specification executable des machines et systemes automatisés de production*. Nancy 1.
- Valckenaers, P., Van Brussel, H., Bongaerts, L., & Wyns, J. (1997). Holonic manufacturing systems. *Integrated Computer-Aided Engineering*, 4 (3), 191-201.
- Van Lamsweerde, A. (2000). Formal specification: a roadmap. In: (pp. 147-159). ACM, pp. 147-159.
- Vicente, K. (1999). *Cognitive work analysis: Toward safe, productive, and healthy computer-based work*. CRC Press.
- Vicente, K., Mumaw, R., & Roth, E. (2004). Operator monitoring in a complex dynamic work environment: A qualitative cognitive model based on field observations. *Theoretical Issues in Ergonomics Science*, 5 (5), 359-384.
- Viel, M., Cheriaux, F., & Galara, D. (2012). Expérimentation de techniques d'ingénierie système pour la formalisation de données de fonctionnement et de contrôle-commande. *Génie Logiciel*, 100.
- Von Bertalanffy, L. (1968). *General System Theory: Foundations, Development* (Revised edition (december 1968) ed.). Braziller.
- Waldner, J.-B., & Duffin, W. (1992). *CIM, principles of computer-integrated manufacturing*. Wiley Chichester.
- Weilkiens, T. (2007). *Systems engineering with SysML/UML: modeling, analysis, design*. Morgan Kaufmann.
- Wetter, M. (2010). Modelica library for building heating, ventilation and air-conditioning systems.
- Wilber, K. (1997). An integral theory of consciousness. *Journal of Consciousness Studies*, 4 (1), 71-92.
- Wong, C., McFarlane, D., & Agarwal, V. (2002). The intelligent product driven supply chain. In: *Systems, Man and Cybernetics, 2002 IEEE International Conference On* (Vol. 4, pp. 6 pp. vol. 4). IEEE, pp. 6 pp. vol. 4.
- Workgroup OSLC. (2010). OSLC core specification version 2.0. *Open Services for Lifecycle Collaboration, Tech. Rep.*
- Yufei, S., & Kazuo, F. (2005). An inference method of team situation awareness based on mutual awareness. *Cogn. Technol. Work*, 7 (4), 272-287.
- Zachman, J. (1987). A framework for information systems architecture. *IBM systems journal*, 26 (3), 276-292.
- Zarifian, P. (1990). Hiérarchisation, Réseaux et Systèmes de décision dans les grandes entreprises industrielles. *Réseaux*, 8 (41), 93-103.

Annexes

Annexe 1-1 : Etats standards du palier 1300 MWe

Domaines d'exploitation	Etats standard	Inventaire en réfrigérant primaire	Pression (bar abs.)	Température moyenne (°C)	Concentration en bore (ppm)	Puissance neutronique
Réacteur Complètement Déchargé (RCD)	Tout combustible dans BK	-	-	-	-	-
Arrêt Pour Rechargement (APR)	Arrêt à froid pour rechargement	729 m ³ (P4) 657 m ³ (P'4) au-dessus du PJC	Atmos.	10 ≤ T ≤ 60	≥ 2385	0
Arrêt Pour Intervention (API)	Arrêt à froid pour intervention primaire suffisamment ouvert (Le trou d'homme pressuriseur est entièrement ouvert)	≥ NB PTB RRA	Atmos.	10 ≤ T ≤ 60	≥ 2385	0
	Arrêt à froid pour intervention primaire entrouvert	≥ NB PTB RRA	Atmos.	10 ≤ T ≤ 60	≥ 2385	0
	Arrêt à froid normal primaire fermé et dépressurisé	≥ NB PTB RRA	P ≤ 5	10 ≤ T ≤ 60	≥ 2385	0
Arrêt Normal sur RRA (AN/RRA)	Arrêt à froid normal	Primaire Plein	5 ≤ P ≤ 31	10 ≤ T ≤ 90	≥ CB _{AF}	0
	Arrêt intermédiaire monophasique	Primaire Plein	25 ≤ P ≤ 31	90 ≤ T ≤ 180	≥ CB _{AF}	0
	Arrêt intermédiaire diphasique aux conditions RRA connecté	Primaire Plein Pressuriseur diphasique	25 ≤ P ≤ 31	120 ≤ T ≤ 180	≥ CB _{AF}	0
Arrêt Normal sur GV (AN/GV)	Arrêt intermédiaire diphasique aux conditions RRA isolé	Primaire Plein Pressuriseur diphasique	27 ≤ P ≤ 31	160 ≤ T ≤ 180	≥ CB _{AF}	0
	Arrêt intermédiaire diphasique sur GV	Primaire Plein Pressuriseur diphasique	27 ≤ P ≤ 31 Ou 160 ≤ T ≤ P ₁₂		≥ CB _{AF}	0
	Arrêt à chaud	Primaire Plein Pressuriseur diphasique	P ₁₁ ≤ P ≤ 155 Et P ₁₂ ≤ T ≤ 297,2 ^{+3/-2}		≥ CB _{AC}	0
Réacteur en Production (RP)	Recherche de la criticité	Primaire Plein Pressuriseur diphasique	≈ 155	297,2 ^{+3/-2}	Recherche CB critique	≈ 0
	Attente à chaud	Primaire Plein Pressuriseur diphasique	≈ 155	297,2 ^{+3/-2}	CB critique	≤ 2% Pn
	Puissance	Primaire Plein Pressuriseur diphasique	≈ 155	297,2 ^{+3/-2}	CB critique	2% Pn ≤ P ≤ 100 % Pn

Tableau 22 : Correspondance entre domaines d'exploitations et états standard du palier 1300MWe (Kerkar & Paulin, 2012)

Annexe 3-1 : Modélisation fonctionnelle selon le paradigme systémique

Selon l'interprétation du paradigme systémique faites par (Galara, 1995)(Figure 179) le modèle de compréhension du système comme un TOUT correspond au modèle fonctionnel.

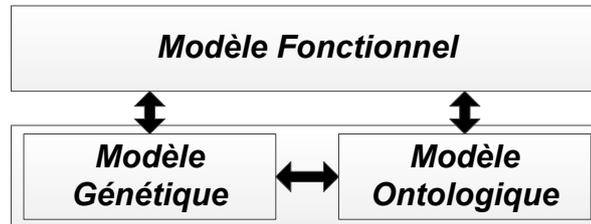


Figure 179 : Interprétation du paradigme systémique par (Galara, 1995)

- **Le modèle fonctionnel** d'un système est une description externe de tous ses comportements attendus dans son environnement, pour représenter son fonctionnement indépendant de toutes les contraintes d'implantation. Notons cependant, que cette modélisation fonctionnelle met en jeu tous les acteurs de modélisation qu'ils soient fonctionnel génétique ou ontologique. D'un point de vue de la co-spécification cela correspond pour nous à intégrer l'ensemble des ingénieries spécialistes impliquées dans le projet pour décrire le fonctionnement attendu du système d'intérêt.
- **Le modèle ontologique** d'un système est une description interne de tous ses comportements technologiques pour représenter son fonctionnement en tenant compte des contraintes de conception. Ce modèle est une description physique et normative en termes de matériels et de logiciels supportant la réalisation du système d'intérêt.
- **Le modèle génétique** d'un système est une description à la fois externe et interne de son fonctionnement distribué qui a pour objectif de garantir son évolution en reliant l'approche descendante de modélisation fonctionnelle indépendante de toute technologie avec l'approche ascendante de modélisation ontologique dépendante de la technologie existante. Le modèle génétique effectue l'interface entre le modèle fonctionnel et le modèle ontologique.

Annexes

Annexe 4-1 : Spécification d'un AMI avec les outils PRIAM et SPEX

Logical Unit	Function Name	Meaning	Class	Algorithm
	Mon_cp	Monitoring the current position	Basic	

↙ Interface description

Function mon_cp Interface Editor

File Help

AUTHOR : CRANEACN_GSIF PROJECT : EIAMUC DATE : 20 Aug 94	READERS :
--	-----------

	Label	Modified	Direction	Mode	CO	CN	NO	NN	SL	Mandato	Service	Access
↑	phy_sgn_pos		Consume	Normal	True	True	True	True	True	True	State Control	Data
	act_state		Produced		True	True	True	True	True	True	State Control	Cyclic
	curr_pos		Produced		True	True	True	True	True	True	State Control	Cyclic
	al_p_state		Produced		False	False	False	False	False	False	State Control	Event

OK Cancel

Figure 180 : Spécification des interfaces d'une fonction AMI avec l'outil PRIAM

Annexes

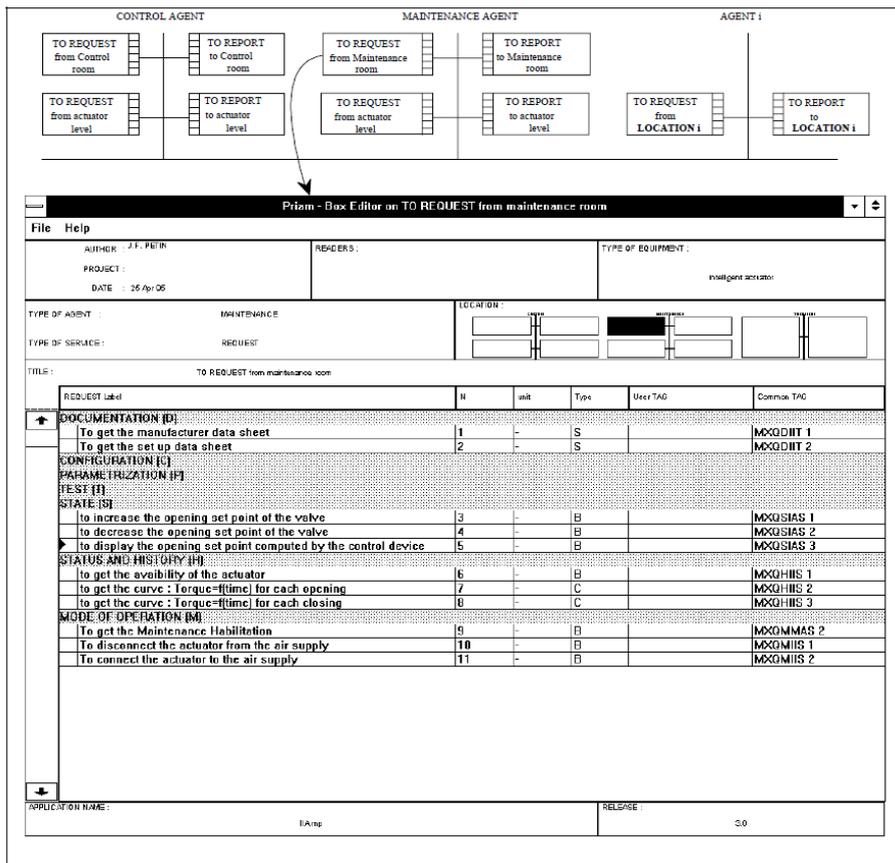


Figure 181 : Exemple de listes de requêtes et de comptes rendus (PRIAM)

Annexes

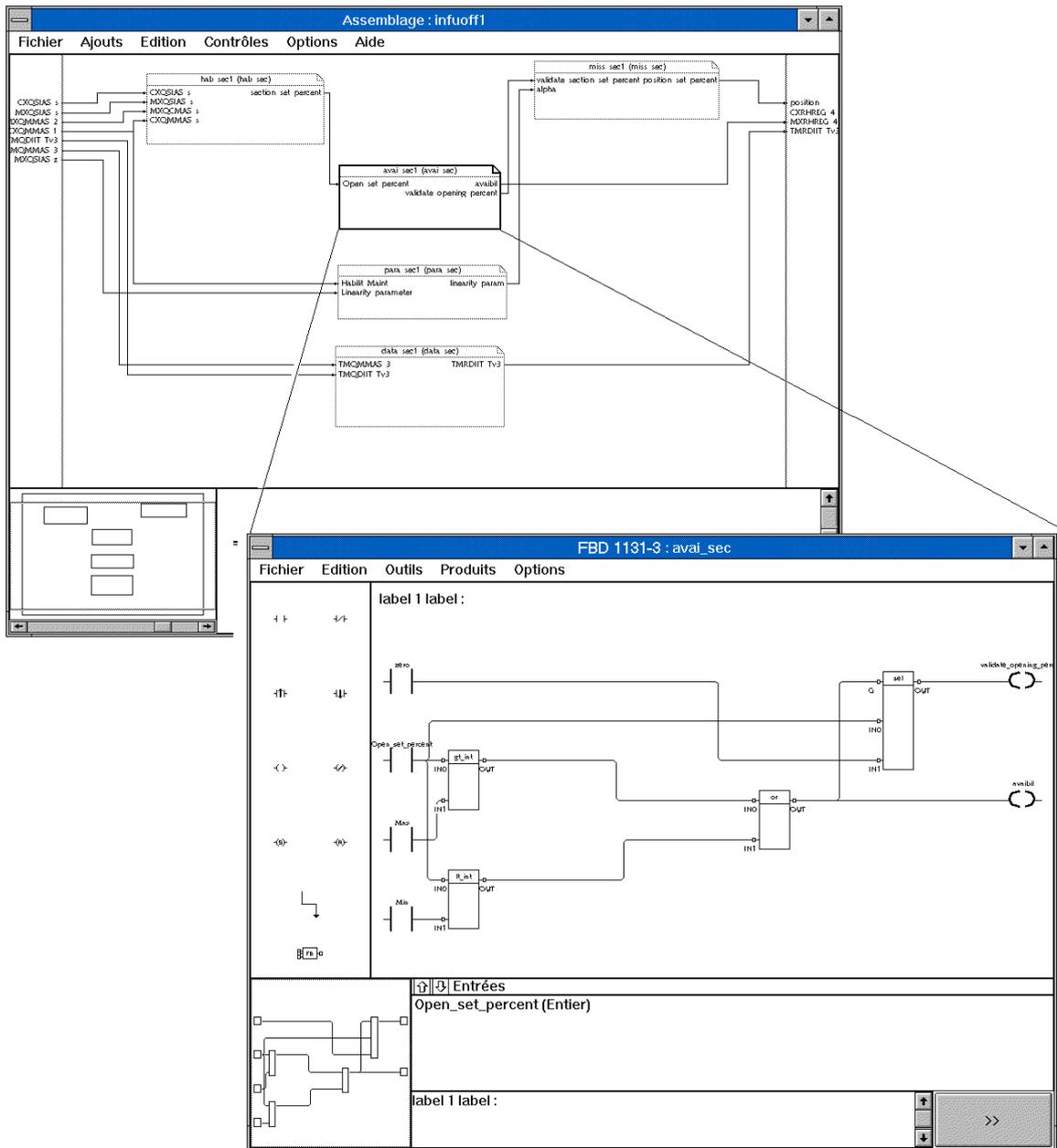


Figure 182 : Spécification comportementale d'un AMI en langage FBD (Bloc Fonctionnel) avec l'outil SPEX

Annexes

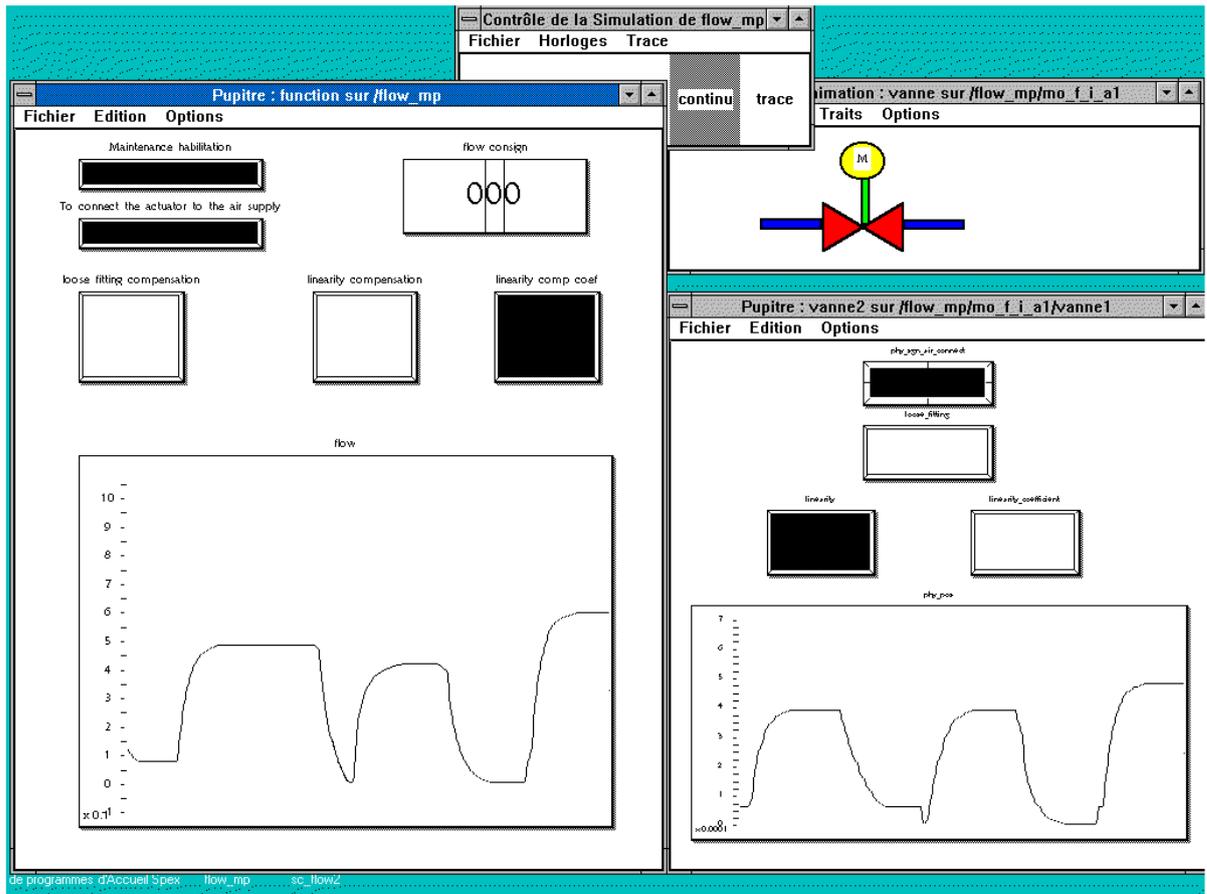


Figure 183 : Simulation du modèle comportemental réalisée sur l'outil SPEX

Annexe 4-2 : Structuration d'un espace collaboratif de co-spécification

- Retourner au parent
- Index de salle
- Accueil
- Domaine Opérationnel
- Domaine Ingénierie Opérationnel
- Domaine Ingénierie Système
- Domaine Ingénierie Sécurité
- Domaine Ingénierie Procédé
- Domaine Ingénierie Automatique
- Domaine Fournisseur Actionnement Intelligent
- Domaine Ingénierie Physiologique
- Co-spécification
- Forums
- Membres de la salle
- Corbeille

Vous êtes dans : cran-these-bouffaron > Co-Spécification - Plate-forme CISPI > Accueil

Accueil

Réserver et modifier Plus d'actions -

Co-Spécification de la plate-forme CISPI du CRAN

Membres du projet :

Domaine Opérationnel : CISPI / Rémi PANNEQUIN

Domaine Ingénierie Opérationnel : Dominique GALARA

Domaine Ingénierie Système : Fabien BOUFFARON, Frédérique MAYER

Domaine Ingénierie Procédé : Jean Pierre HENNEBICQ

Domaine Ingénierie Sécurité : Pascale MARANGE

Domaine Ingénierie Automatisation : Cédric JOIN

Domaine Fournisseur Actionnement Intelligent : Rémi PANNEQUIN

Domaine Ingénierie Physiologique : Jean Marc DUPONT

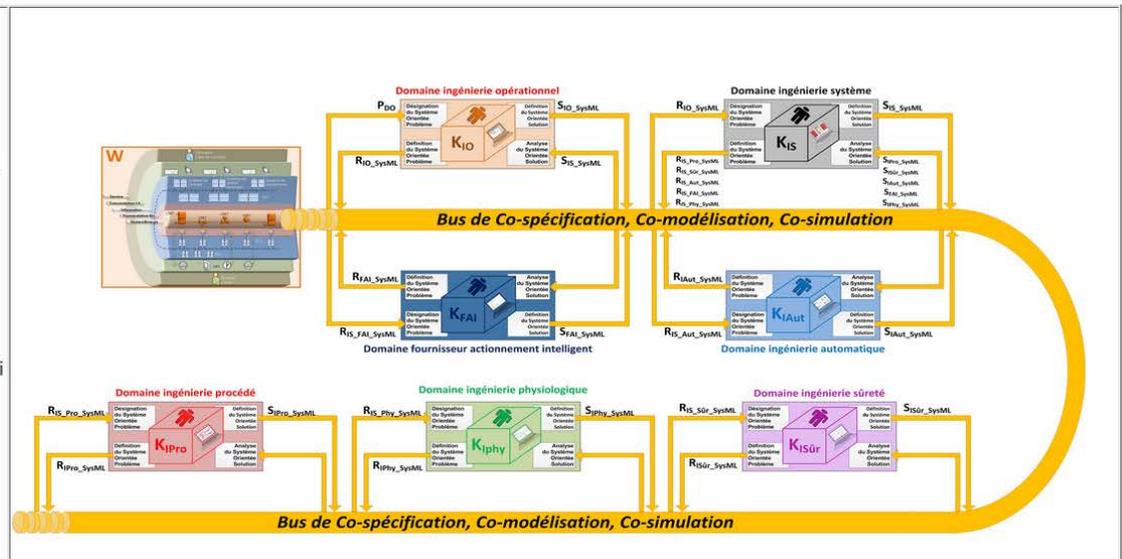


Figure 184 : Structuration de l'espace "Quickplace" de co-spécification de la plate-forme CISPI

Annexes

The screenshot shows a web application interface for 'Domaine Ingénierie Système'. At the top, there is a blue header with 'Mes espaces'. Below it, a grey bar contains the title 'Domaine Ingénierie Système'. A green notification bar states: 'Accueil' a été enregistré. The breadcrumb trail reads: 'Vous êtes dans : cran-these-bouffaron > ... > [Salle parente] > Domaine Ingénierie Système > Accueil'. The main content area is titled 'Accueil' and includes buttons for 'Réserver et modifier' and 'Plus d'actions'. A large, bold, underlined heading reads 'Domaine d'ingénierie système'. Below this, the section 'Membres de la salle :' lists 'Fabien BOUFFARON' and 'Frédérique MAYER'. At the bottom, there are two diagrams. The left diagram shows a 3D structure with labels: 'COMMUNICATION', 'COMMAND', 'CONTROL', 'EMERGENCE', 'HIERARCHY', and 'OPEN'. The right diagram is a flowchart titled 'Fonction Condui' with 'Objectifs' leading to 'Prescrire situation à atteindre' and 'Construire la situation', with a 'Intelligence' box connected to the latter.

Figure 185 : Structuration d'un domaine d'ingénierie en espaces problème et solution et connaissances

Annexes

Lotus Quickr Mes espaces

Mes espaces

Co-spécification

Vous êtes dans : cran-these-bouffaron > ... > [Salle parente] > Co-spécification > Spécification - EP Ingénierie Système - ES Ingénierie Procédé

Spécification - EP Ingénierie Système - ES Ingénierie Procédé

Créé le aujourd'hui à 00:31 par bouffaro5 | Dernière modification le aujourd'hui à 00:34 par bouffaro5 | Public

Télécharger Nouveau Plus d'actions

1-2 sur 2 Page 1

<input type="checkbox"/>	Type	Nom
<input type="checkbox"/>	📁	Spécification Descriptive (Problème) ▾
<input type="checkbox"/>	📁	Spécification Prescriptive (Solution) ▾

Afficher : 10 | 25 | 50 | 100 éléments Atteindre la page 1 sur 1

S'abonner à ce dossier

Figure 186 : Structuration de la salle "Co-Spécification" en dossier de spécification entre espaces problème et solution

Annexes

Annexe 5-1 : Définition des exigences des parties prenantes intéressées (R_{IO SysML}) – (Espace-problème d'ingénierie opérationnelle)

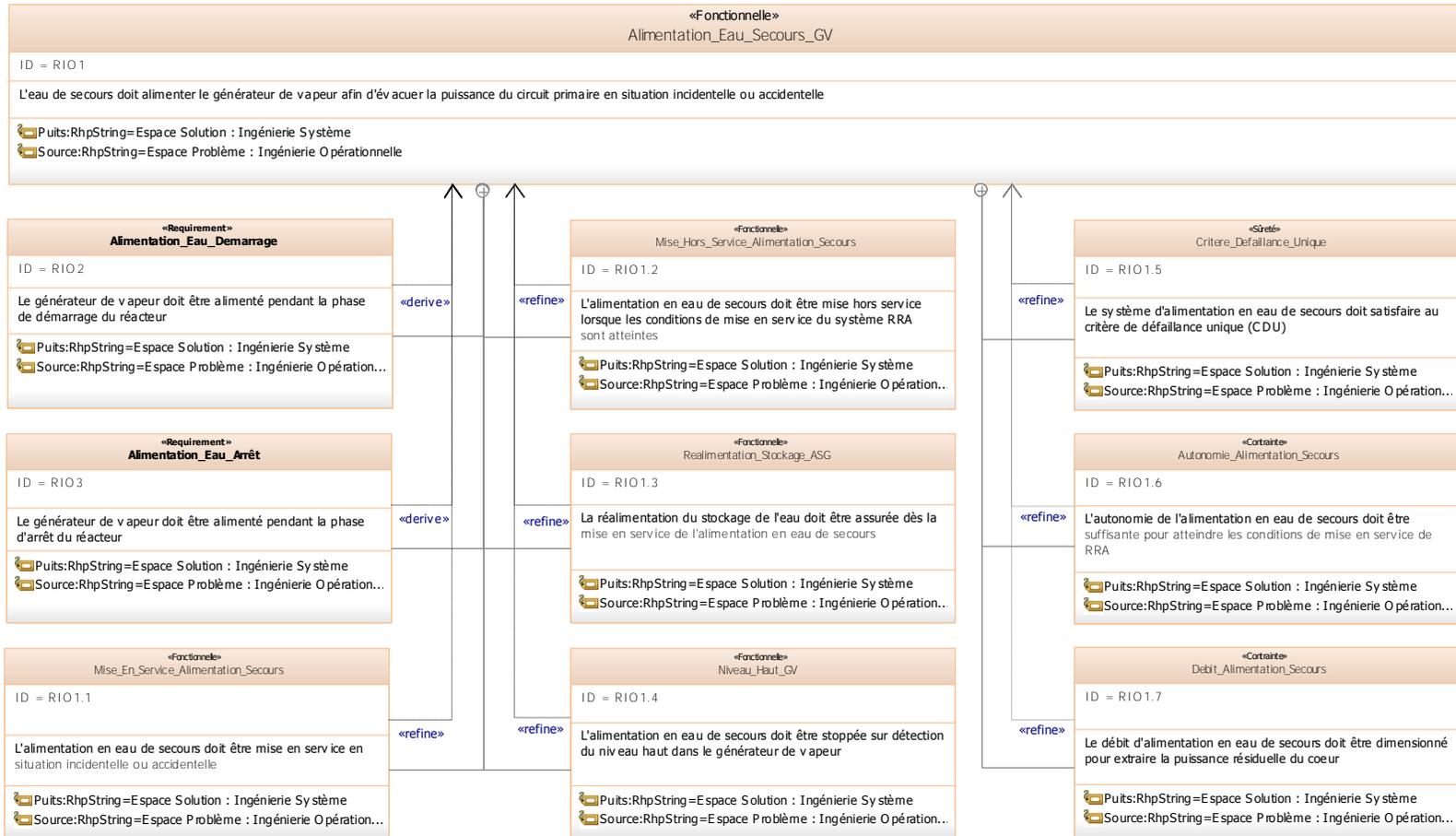


Figure 187 : Diagramme d'exigence SysML - Exigences décrites par l'espace problème d'ingénierie opérationnelle (R_{IO SysML})

Annexes

Annexe 5-2 : Analyse des exigences parties prenantes (R_{IO_SysML}) – (Espace-solution d'ingénierie système)

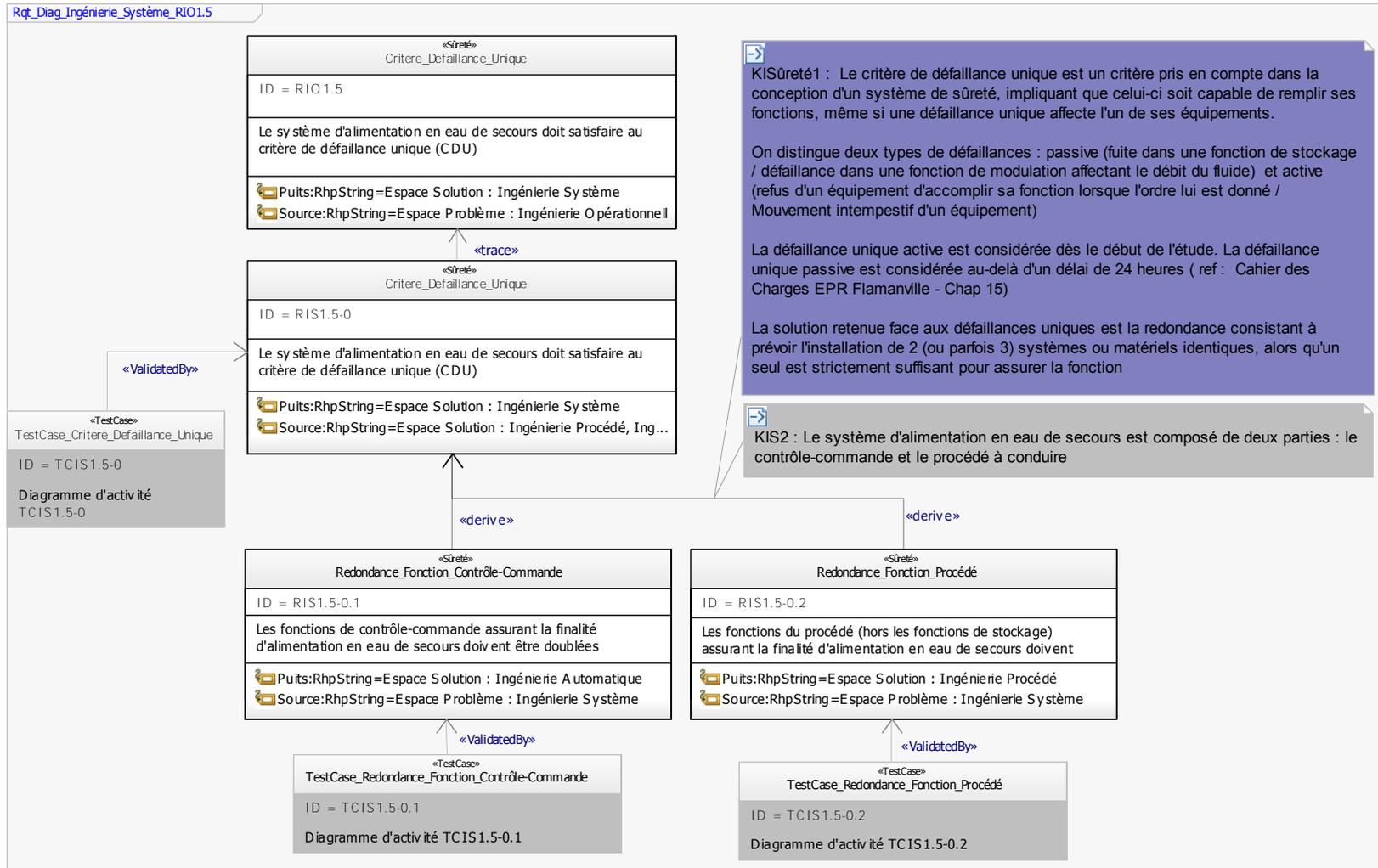


Figure 188 : Diagramme d'exigences SysML - Raffinement de l'exigence opérationnelle (RIO 1.5) par l'espace-solution d'ingénierie système

Annexes

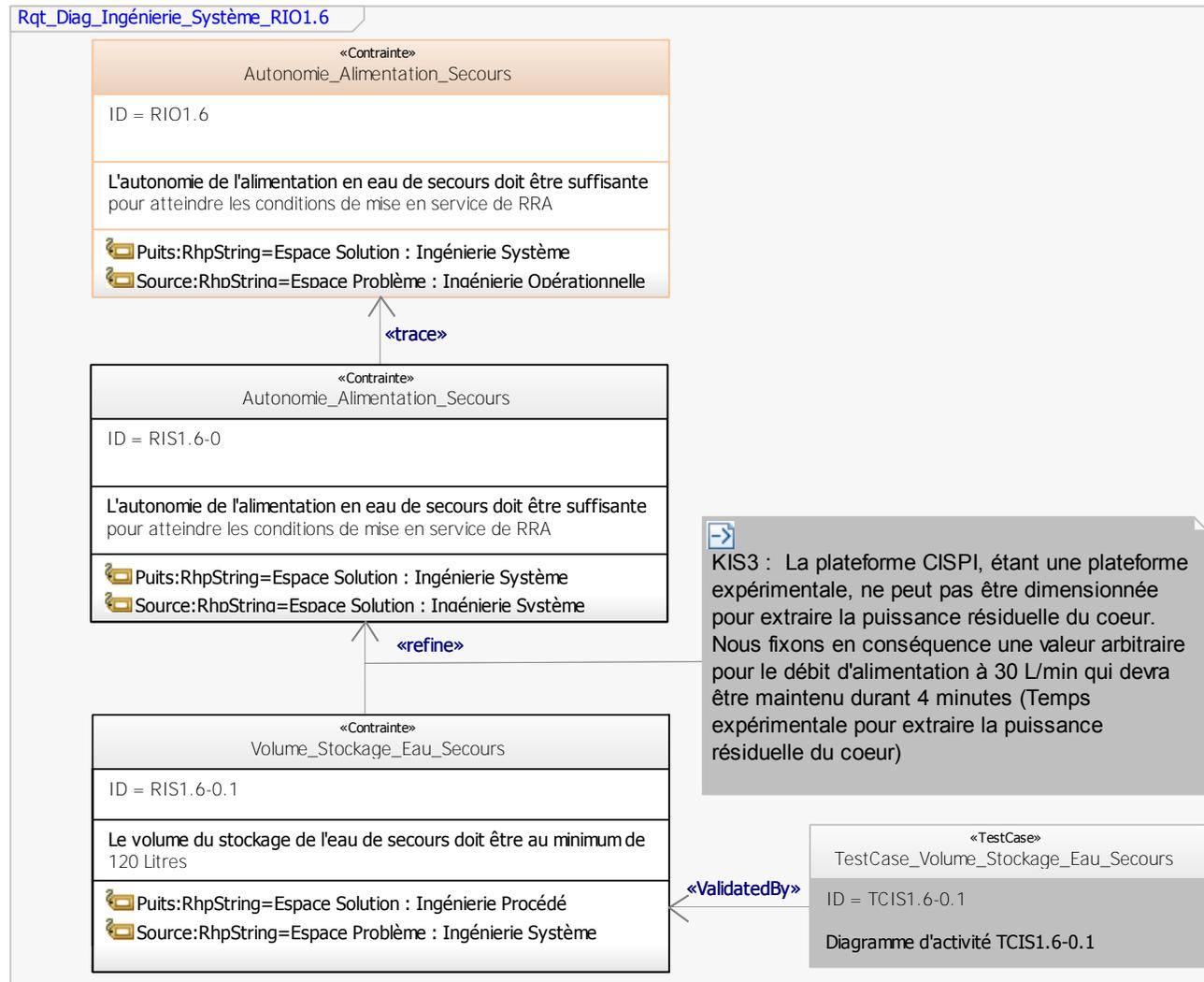


Figure 189 : Diagramme d'exigences SysML - Raffinement de l'exigence opérationnelle (RIO 1.6) par l'espace-solution d'ingénierie système

Annexes

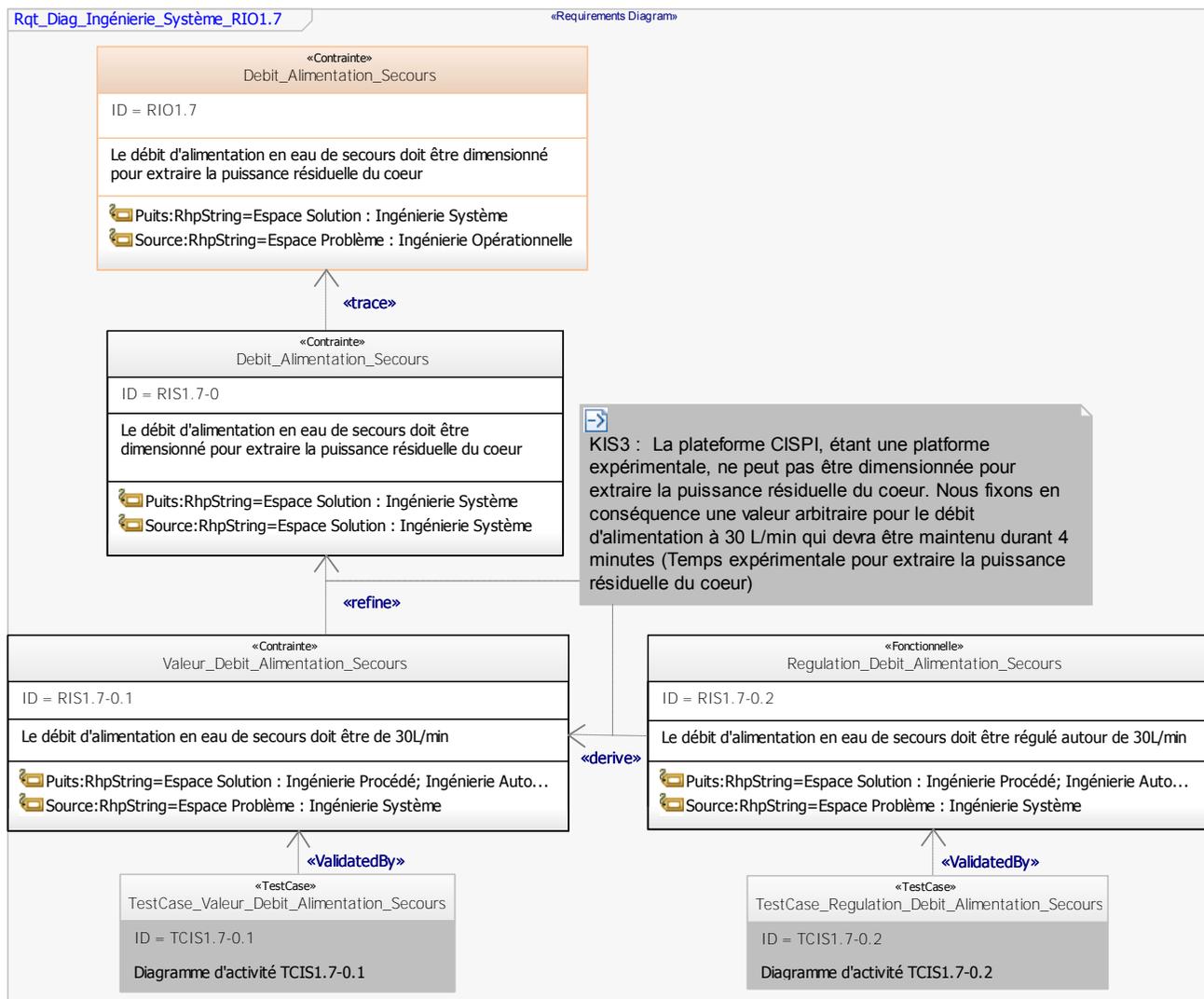


Figure 190 : Diagramme d'exigences SysML - Raffinement de l'exigence opérationnelle (RIO 1.7) par l'espace-solution d'ingénierie système

Annexes

Annexe 5-3 : Exigences et problèmes systèmes (*R_{IS Pro SysML}*) décrits à l'espace-solution d'ingénierie du procédé

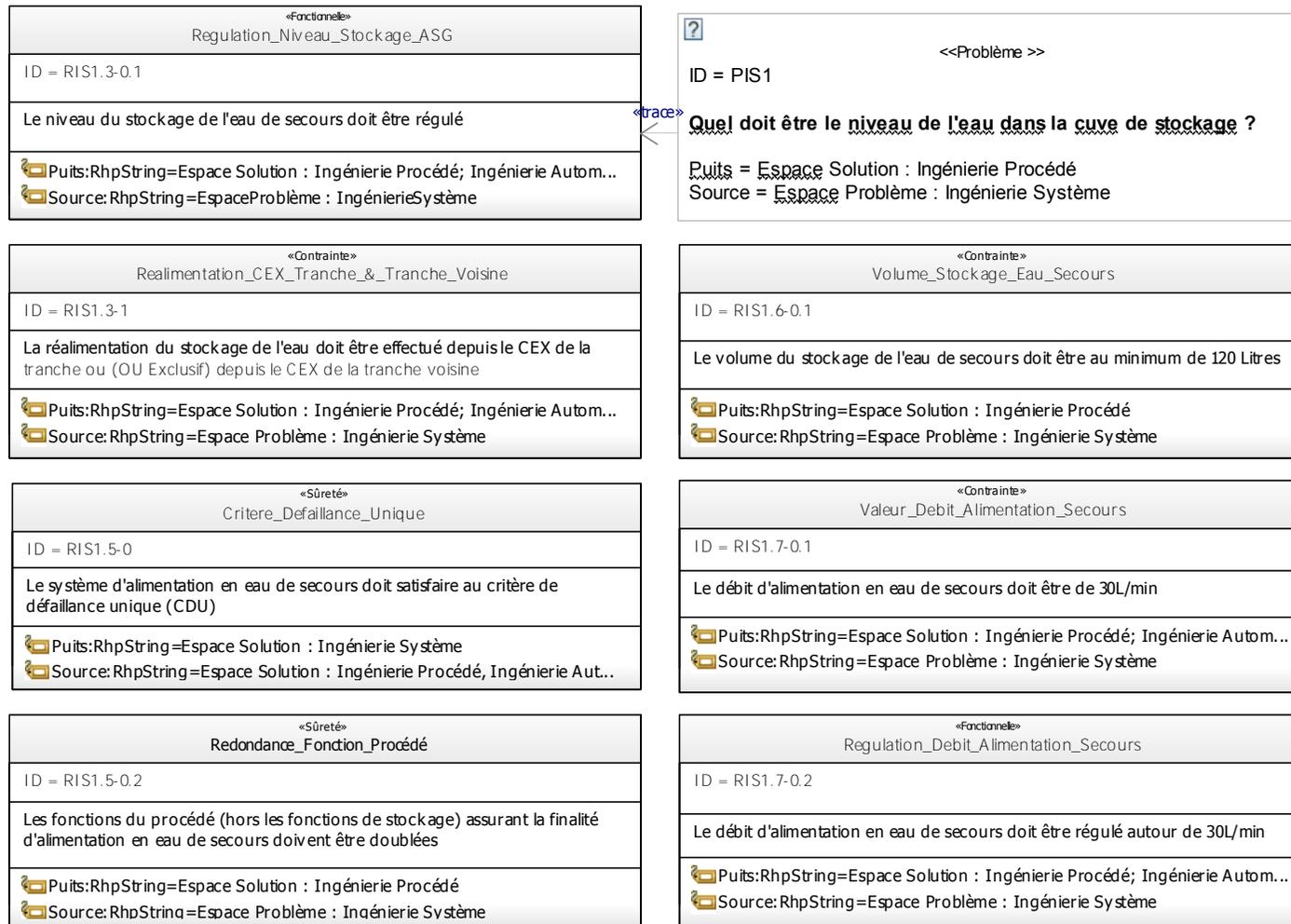


Figure 191 : Diagramme d'exigences SysML - Exigences et problèmes systèmes (*R_{IS Pro SysML}*) relatives au procédé

Annexes

Annexe 5-4 : Modèle de l'interaction Procédé-Environnement

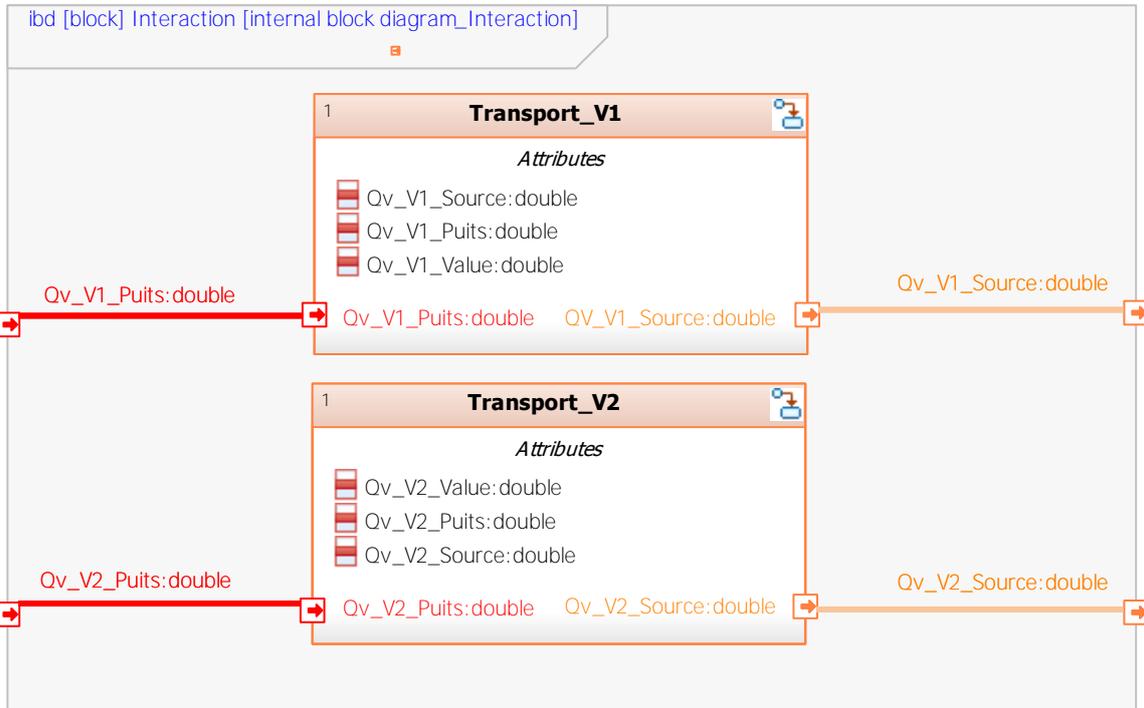


Figure 192 : Spécification des fonctions de transport par les voies V1 et V2 entre la plate-forme CISPI et son environnement

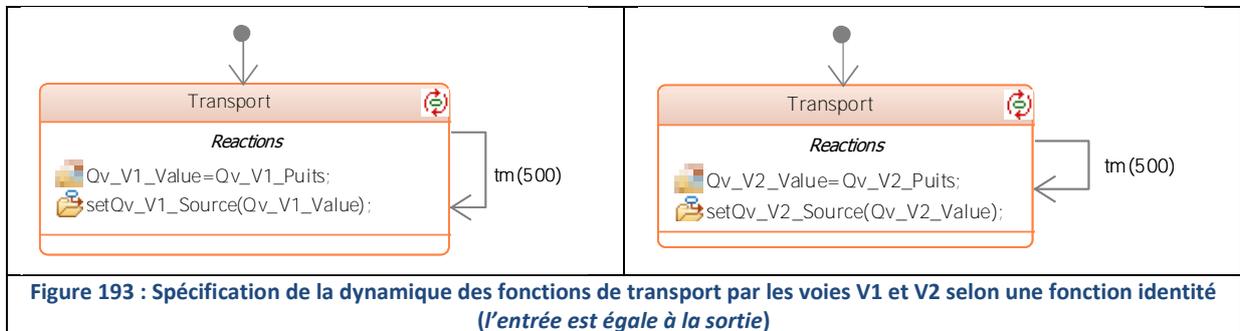


Figure 193 : Spécification de la dynamique des fonctions de transport par les voies V1 et V2 selon une fonction identité (l'entrée est égale à la sortie)

Annexe 5-5 : Spécification du procédé de la plate-forme CISPI (S_{IPro})

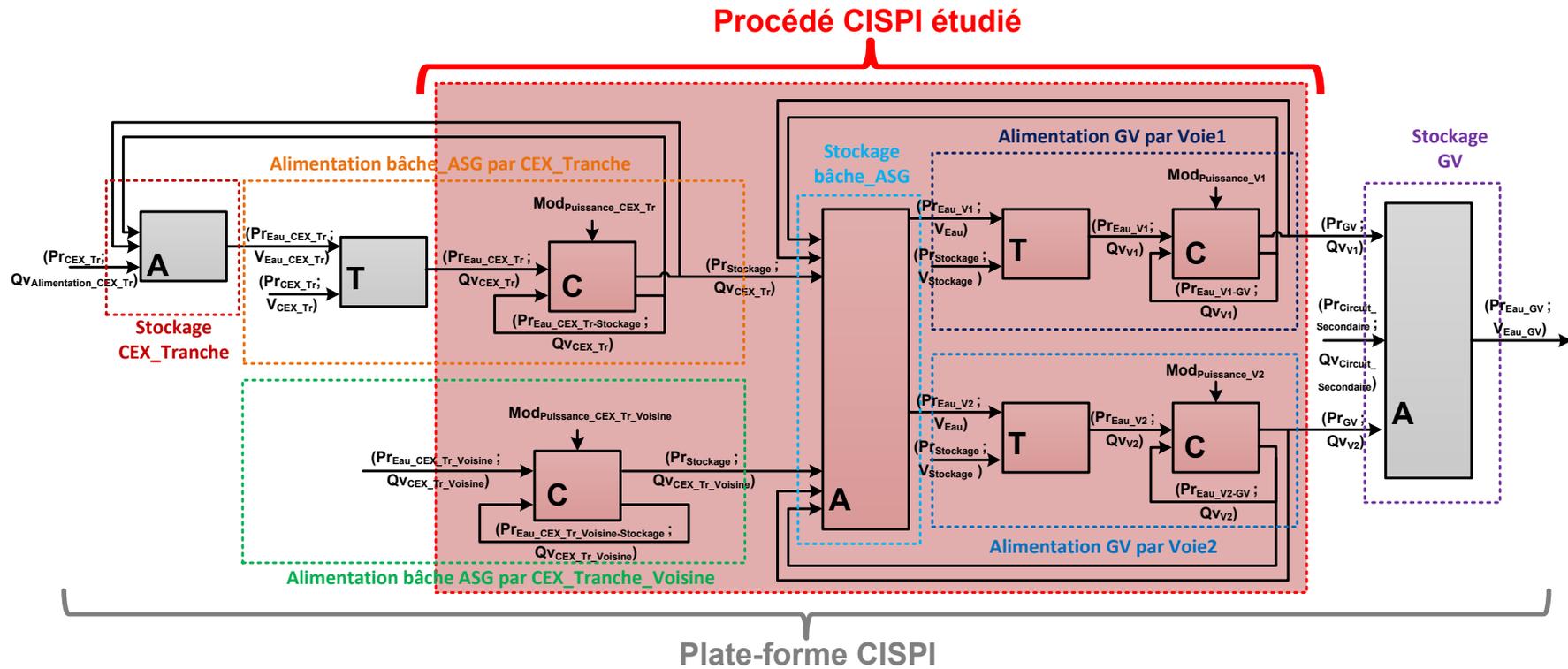


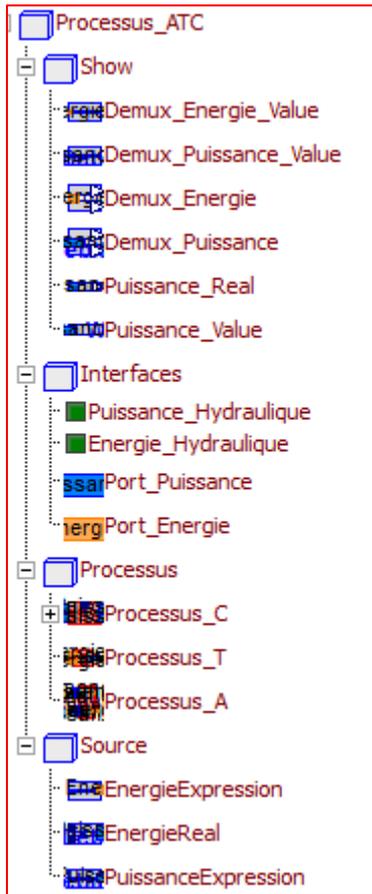
Figure 194 : Spécification du procédé CISPI à un niveau fonctionnel (Point de vue Structurel)

Annexes

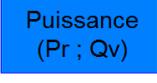
Pr_{CEX_Tr}	Pression à la surface de l'eau dans la cuve CEX_Tranche – (Cuve Ouverte) Pr _{CEX_Tranche} = Pression atmosphérique
Qv_{CEX_Tr}	Débit volumique d'alimentation de la cuve CEX_Tranche
Pr_{Eau_CEX_Tr}	Pression de l'eau en sortie de la cuve CEX_Tranche
V_{Eau_CEX_Tr}	Volume de l'eau à l'intérieur de la cuve CEX_Tranche
V_{CEX_Tr}	Volume du fluide à la surface de l'eau - (Cuve Ouverte) V _{CEX_Tranche} = Volume de l'air = ∞
Mod_{Puissance_CEX_Tr}	Commande du débit d'alimentation de la voie CEX_Tranche
Pr_{Eau_CEX_Tr_Voisine}	Pression de l'eau en sortie de la cuve CEX_Tranche_Voisine
Mod_{Puissance_CEX_Tr_Voisine}	Commande du débit d'alimentation de la voie CEX_Tranche_Voisine
Qv_{CEX_Tr}	Débit volumique d'alimentation de la bache ASG par la voie CEX_Tranche
Pr_{Stockage}	Pression à la surface de l'eau dans la bache d'ASG – (Cuve Ouverte) Pr _{Stockage} = Pression atmosphérique
Qv_{CEX_Tr_Voisine}	Débit volumique d'alimentation de la bache ASG par la voie CEX_Tranche_Voisine
Pr_{Eau_V1}	Pression de l'eau en sortie (Voie1) de la bache ASG
V_{Eau}	Volume de l'eau à l'intérieur de la bache ASG
V_{Stockage}	Volume du fluide à la surface de l'eau - (Cuve Ouverte) V _{Stockage} = Volume de l'air = ∞
Qv_{v1}	Débit volumique de l'eau à travers la voie 1
Mod_{Puissance_v1}	Commande du débit d'alimentation de la voie 1
Pr_{GV}	Pression à la surface de l'eau dans le GV– (Cuve Ouverte) Pr _{GV} = Pression atmosphérique
Pr_{Eau_V2}	Pression de l'eau en sortie (Voie2) de la bache ASG
Qv_{v2}	Débit volumique de l'eau à travers la voie 2
Mod_{Puissance_v2}	Commande du débit d'alimentation de la voie 2
Pr_{Circuit_Secondaire}	Pression dans le circuit secondaire
Qv_{Circuit_Secondaire}	Débit volumique de l'eau dans le circuit secondaire
Pr_{Eau_GV}	Pression de l'eau en sortie du GV
V_{Eau_GV}	Volume d'eau à l'intérieur du GV

Table 1 : Légende spécification du procédé CISPI (*S_{Pro}*)

Annexe 5-6 : Bibliothèque Modelica – Processus Accumulation, Transport, Conversion



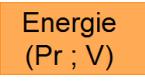
Port :

- 
Processus_TEF.Interfaces.Port_Puissance

Modélise un port de type « puissance » représenté par un couple : {pression (en Pa) ; débit volumique (en $m^3.s^{-1}$)}.

Modelica Definition:

```
connector Port_Puissance
extends Processus_TEF.Interfaces.Puissance_Hydraulique;
end Port_Puissance;
```

- 
Processus_TEF.Interfaces.Port_Energie

Modélise un port de type « énergie » représenté par un couple : {pression (en Pa) ; volume (en m^3)}.

Modelica Definition:

```
connector Port_Energie
extends Processus_TEF.Interfaces.Energie_Hydraulique;
end Port_Energie;
```

Interaction :



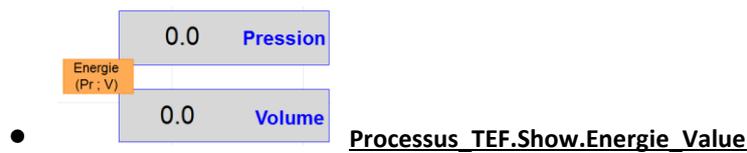
Processus_TEF.Show.Puissance_Value

Affiche les valeurs des variables composant un couple de type « puissance » : {pression (en Pa) ; débit volumique (en $m^3.s^{-1}$)}

Modelica Definition:

```
block Puissance_Value
Real Qv;
Real Pr;
Interfaces.Port_Puissance port_Puissance
equation
Qv = port_Energie.Qv;
Pr = port_Energie.Pr;
end Puissance_Value;
```

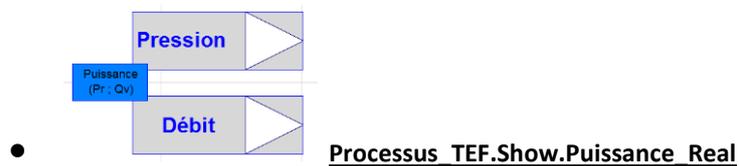
Annexes



Affiche les valeurs des variables composant un couple de type « énergie » : {pression (en Pa) ; volume (en m³)}

Modelica Definition:

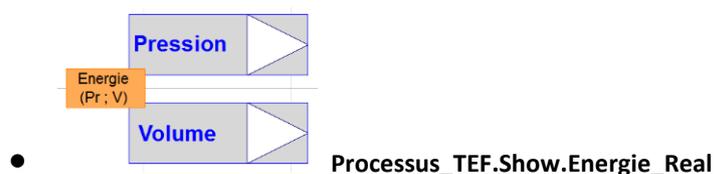
```
block Energie_Value
Real V;
Real Pr;
Interfaces.Port_Energie port_Energie
equation
V = port_Puissance.V;
Pr = port_Puissance.Pr;
end Energie_Value;
```



Divise un couple de type « puissance » en deux connecteurs de type réel : {pression; débit volumique}

Modelica Definition:

```
block Puissance_Real
Interfaces.Port_Puissance port_Puissance
Modelica.Blocks.Interfaces.RealOutput Qv
Modelica.Blocks.Interfaces.RealOutput Pr
equation
Qv = port_Puissance.Qv;
Pr = port_Puissance.Pr;
end Puissance_Real;
```



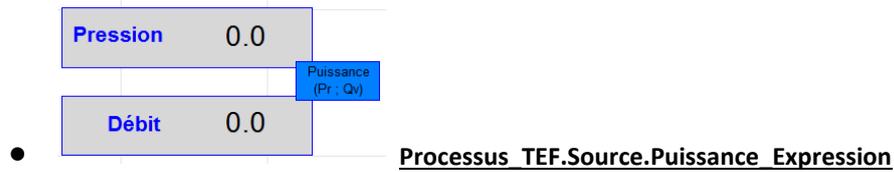
Divise un couple de type « énergie » en deux connecteurs de type réel : {pression ; volume}

Modelica Definition:

```
block Energie_Real
Interfaces.Port_Energie port_Energie
Modelica.Blocks.Interfaces.RealOutput V
Modelica.Blocks.Interfaces.RealOutput Pr
equation
V = port_Energie.V;
Pr = port_Energie.Pr;
end Energie_Real;
```

Annexes

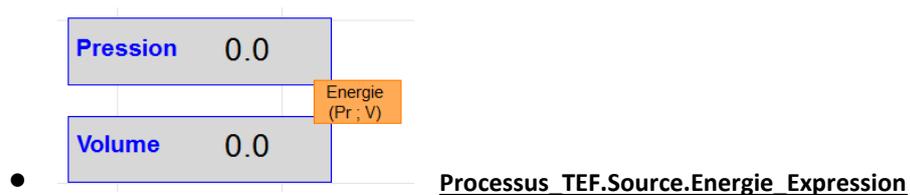
Source :



Définit les valeurs des variables composant un couple de type «puissance » : {pression (en Pa) ; débit volumique (en $m^3 \cdot s^{-1}$)} sous la forme de deux réels.

Modelica Definition:

```
block Puissance_Expression
parameter Real Pr;
parameter Real Qv;
Interfaces.Port_Puissance port_Puissance
equation
port_Puissance.Pr = Pr;
port_Puissance.Qv = Qv;
end Puissance_Expression;
```



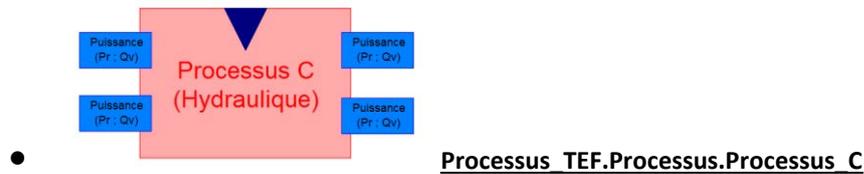
Définit les valeurs des variables composant un couple de type «énergie » : {pression (en Pa) ; volume (en m^3)} sous la forme de deux réels.

Modelica Definition:

```
block Energie_Expression
parameter Real Pr;
parameter Real V;
Interfaces.Port_Energie port_Energie
equation
port_Energie.Pr = Pr;
port_Energie.V = V;
end Energie_Expression;
```

Annexes

Processus :



Un processus de dissipation de type F, dû à la restriction d'une canalisation par exemple, produit une puissance en sortie et des pertes de charges que l'on reboucle à l'entrée du processus pour traduire d'un point de vue énergétique une contre réaction.

Modelica Definition:

```

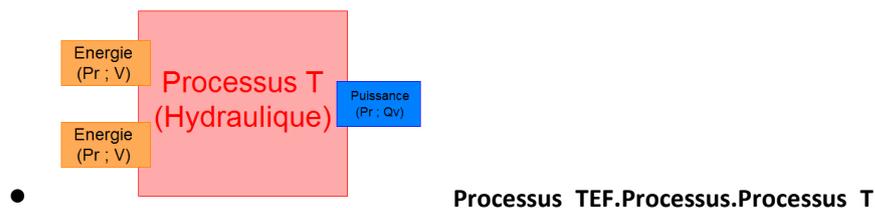
model Processus_C
parameter Modelica.SIunits.Pressure Pression_Sortie = 101325 "Pression_Cuve_Sortie";
parameter Real k = 0.05 "Constante ";
parameter Real Diametre_Forme = 0.038 "Diametre Forme";

Real Pression_Voie;
Real Section_Voie;

Interfaces.Port_Puisseance port_Entree1
Interfaces.Port_Puisseance port_Entree2
Interfaces.Port_Puisseance port_Sortie2
Interfaces.Port_Puisseance port_Sortie1
Modelica.Blocks.Interfaces.RealInput Mod_Puisseance
equation
Section_Forme = (Diametre_Forme)^2 / 4 * Modelica.Constants.pi;
Pression_Voie = if opening > 0 then (k*995.58/2* (port_Entree1.Qv/Section_Forme)^2)/2*Mod_Puisseance+ Pression_Sortie else Pr
ession_Sortie;
port_Sortie1.Qv= if opening >0 then port_Entree1.Qv else 0;
port_Sortie1.Pr= Pression_Sortie;
port_Sortie2.Qv= port_Entree1.Qv;
port_Sortie2.Pr= Pression_Voie - Pression_Sortie;

end Processus_C;

```



Un processus d'échange de type T, produit un flux de puissance. Cette circulation est due à une différence de niveau d'énergie entre l'énergie en entrée (Pr, V) et l'énergie en sortie (Pr; V).

Modelica Definition:

```

model Processus_T
parameter Modelica.SIunits.Area Section_Cuve ;
parameter Modelica.SIunits.Area Section_Sortie ;
Interfaces.Port_Puisseance port_Sortie
Interfaces.Port_Energie port_Entree1
Interfaces.Port_Energie port_Entree2
equation

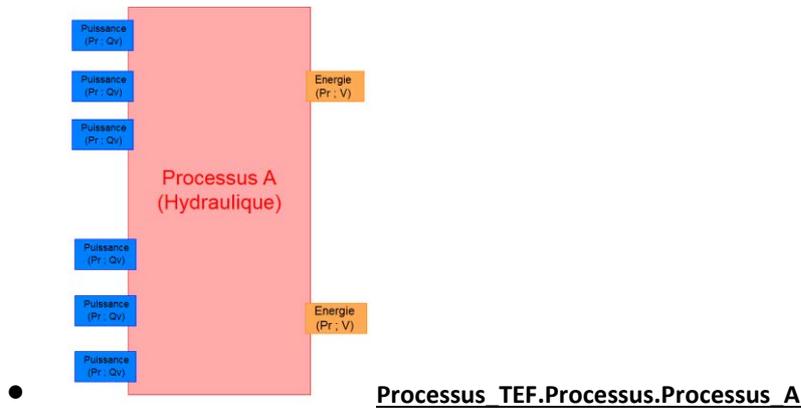
```

Annexes

```

port_Sortie.Pr=port_Entree1.Pr;
port_Sortie.Qv= Section_Sortie*sqrt(abs(((2*(port_Entree2.Pr -port_Entree1.Pr)) /995.58) + 2*9.80665 *(port_Entree1.V /
Section_Cuve)));
end Processus_T;

```



Ce processus de stockage de type T, produit deux énergies hydrauliques en sortie (deux sorties au niveau du stockage). Cette énergie résulte du bilan de l'accumulation des puissances hydrauliques en entrée et en sortie.

Modelica Definition:

```

model Processus_A
parameter Modelica.SIunits.Area Section_Cuve = 1;
parameter Real h0 = 3.0 "Hauteur Initiale";
parameter Modelica.SIunits.Pressure Pression_Cuve = 101325 "Pression à la surface de l'eau";
Real h "Hauteur Cuve";
Modelica.SIunits.Pressure Pression_Cuve_0 "Pression en sortie de cuve à débit nul";
Real Integrale_DE "Integrale_Debit_Entree";
Real Integrale_DS "Integrale_Debit_Sortie";
Interfaces.Port_Puissance port_Entree3
Interfaces.Port_Puissance port_Entree4
Interfaces.Port_Energie port_Sortie1
Interfaces.Port_Puissance port_Entree5
Interfaces.Port_Puissance port_Entree6
Interfaces.Port_Puissance port_Entree2
Interfaces.Port_Puissance port_Entree1
Interfaces.Port_Energie port_Sortie2
equation
der(Integrale_DE) = port_Entree3.Qv + port_Entree6.Qv;
der(Integrale_DS) = port_Entree1.Qv + port_Entree4.Qv;
h = h0 + 1/Section_Cuve *(Integrale_DE - Integrale_DS);
Pression_Cuve_0 = (h*995.58*9.80665)+ Pression_Cuve_0;
port_Sortie1.Pr = if port_Entree1.Qv >0 then port_Entree1.Pr+port_Entree2.Pr else Pression_Cuve_0;
port_Sortie1.V = Section_Cuve * h;
port_Sortie2.Pr = if port_Entree4.Qv >0 then port_Entree4.Pr+port_Entree5.Pr else Pression_Cuve_0;
port_Sortie2.V = Section_Cuve * h;
end Processus_A;

```

Annexes

Annexe 5-7 : Table de correspondance SysML-Modelica

Modelica	SysML
Model (Class) (<i>constitue la brique de base pour la modélisation de la structure d'un procédé. Il peut représenter un procédé, un processus, un composant... Il contient des équations qui décrivent les relations entre les ports de connexion (Connector)</i>)	Block (<i>constitue la brique de base pour la modélisation de la structure d'un système. Il peut représenter un système complet, un sous-système ou un composant élémentaire à différents niveaux d'abstractions). Les blocs peuvent posséder également un comportement</i>)
(Object) (<i>Instance de modèle Modelica dimensionné pour un usage</i>)	Parts (<i>instance de bloc</i>)
Variable (Constant/Parameter/Continuous/Discrete) décrit des données appartenant au « model »)	Value (<i>décrit des caractéristiques du bloc. Les valeurs sont des variables stockant des informations d'état du bloc</i>)
Type (<i>décrit le domaine de la valeur, dimension et unité (optionnel)</i>)	ValueType (<i>décrit le domaine de la valeur, dimension et unité (optionnel)</i>)
Connector (<i>Souvent appelés Ports, spécifie les interfaces externes du modèle pour les interactions</i>)	FlowPort (<i>définit un point d'interaction entre les ports. Les ports de type FlowPort autorise la circulation de flux physiques (matières, énergies, données) entre les blocs</i>)
Connector	Flow Specification (<i>spécifie le type d'un flow port non atomique, incluant plusieurs propriétés de flux (Flow Properties)</i>)
Connector	Flow Properties (<i>Définit la propriété d'un flux selon un nom, un type et une direction</i>)
Equation « Connect » (<i>L'équation de connexion est une équation spéciale qui spécifie une interaction entre des connecteurs Modelica de même type</i>)	Connector (<i>relie deux parties entre elles, leur fournissant l'opportunité d'agir à travers des ports</i>)
Equation (<i>spécifie le comportement du « model » selon une modélisation acausale (pas de direction du flux de données)) + Variable</i>)	ConstraintBlock (<i>conditionne l'énoncé d'une contrainte de sorte qu'il peut être appliqué d'une manière réutilisable pour contraindre les propriétés d'autres blocs. Il définit généralement un ou plusieurs paramètres de contraintes qui sont liées aux propriétés d'autres blocs</i>)
Equation	ConstraintProperty (<i>Instance d'un ConstraintBlock pour une utilisation localisée</i>)
Equation	Constraint (<i>représente une expression mathématique contraignant les propriétés physique d'un système</i>)
Variable	ConstraintParameters (<i>Paramètres d'une contrainte</i>)

Tableau 23 : Tableau de correspondance SysML / Modelica

Annexes

Annexe 5-8 : Modélisation de la structure des processus énergétiques (diagramme interne de blocs SysML)

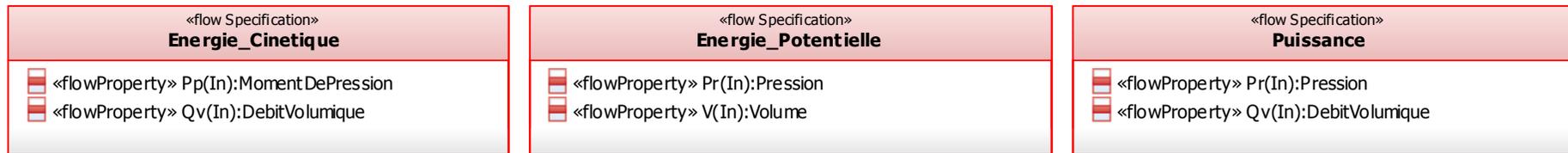


Figure 195 : Spécification de flux non atomique (Flow Specification)

Annexes

Annexe 5-9 : Modélisation de la dynamique des processus énergétiques (diagrammes paramétriques SysML)

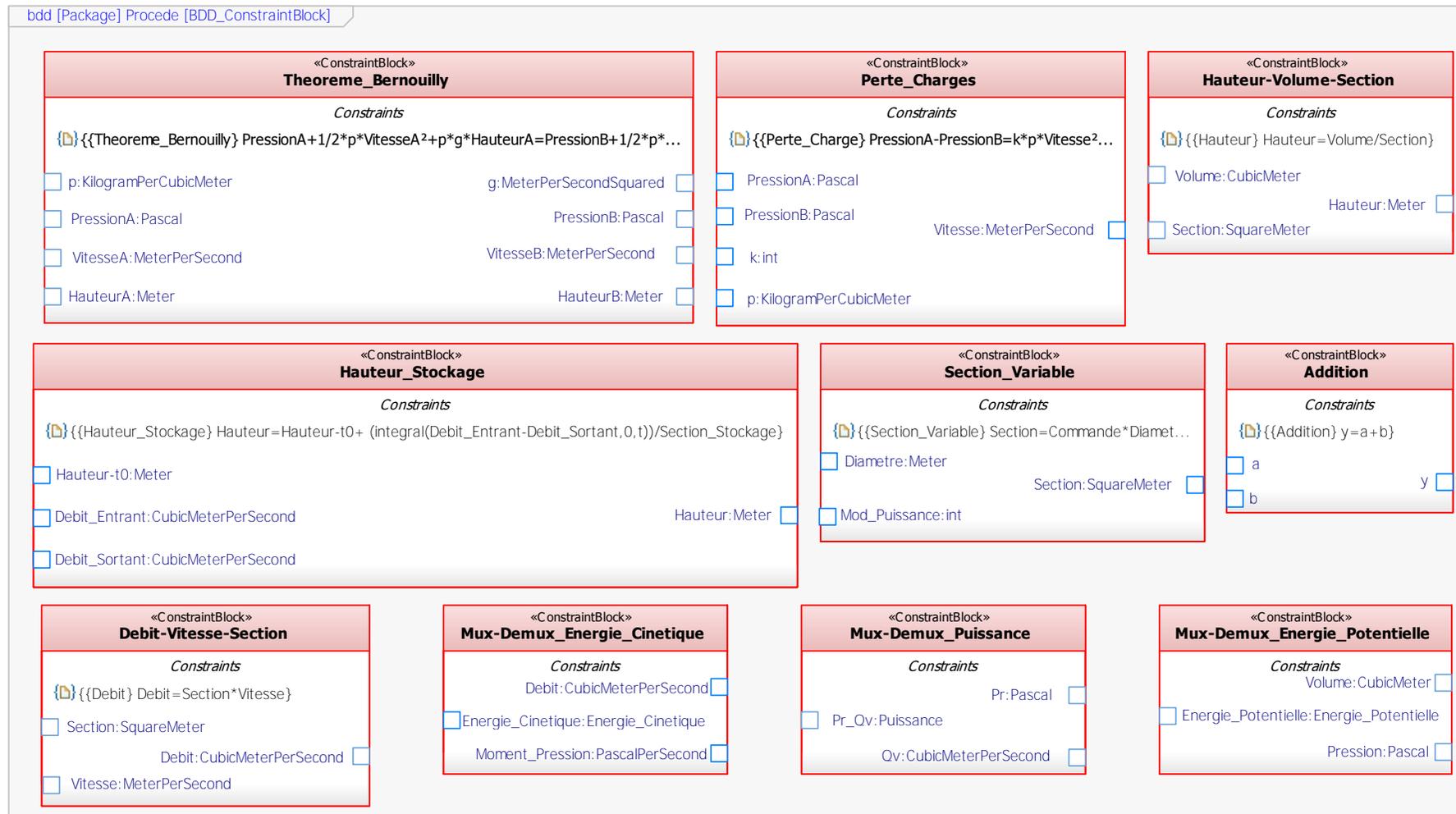


Figure 196 : Diagramme de définition de blocs (bdd) SysML - "Constraint blocks " utilisés pour la définition du comportement des processus A,T,C

Annexes

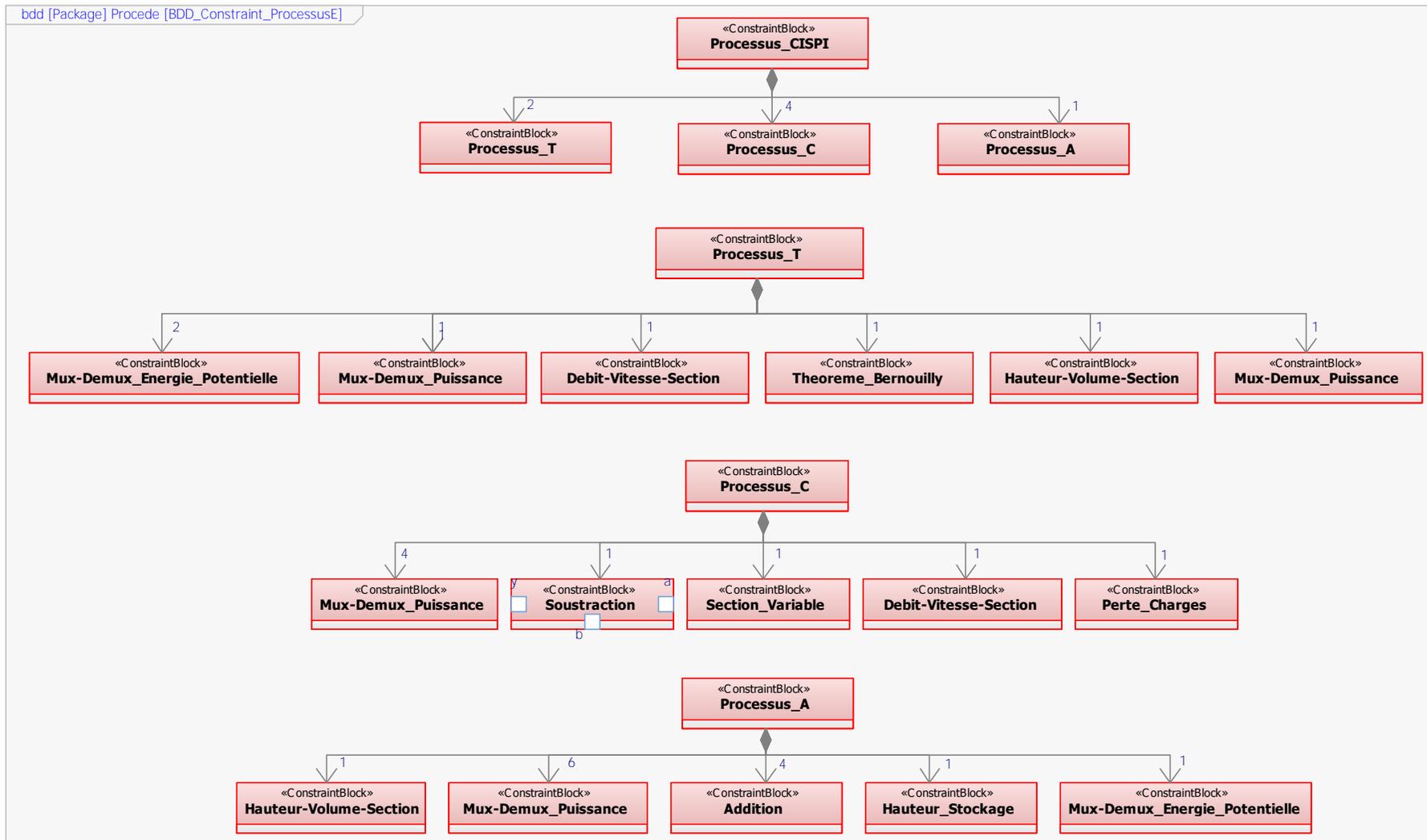


Figure 197 : Diagramme de définition de blocs (bdd) SysML - Composition des processus Accumulation, Transport, Conversion du processus CISPI

Annexes

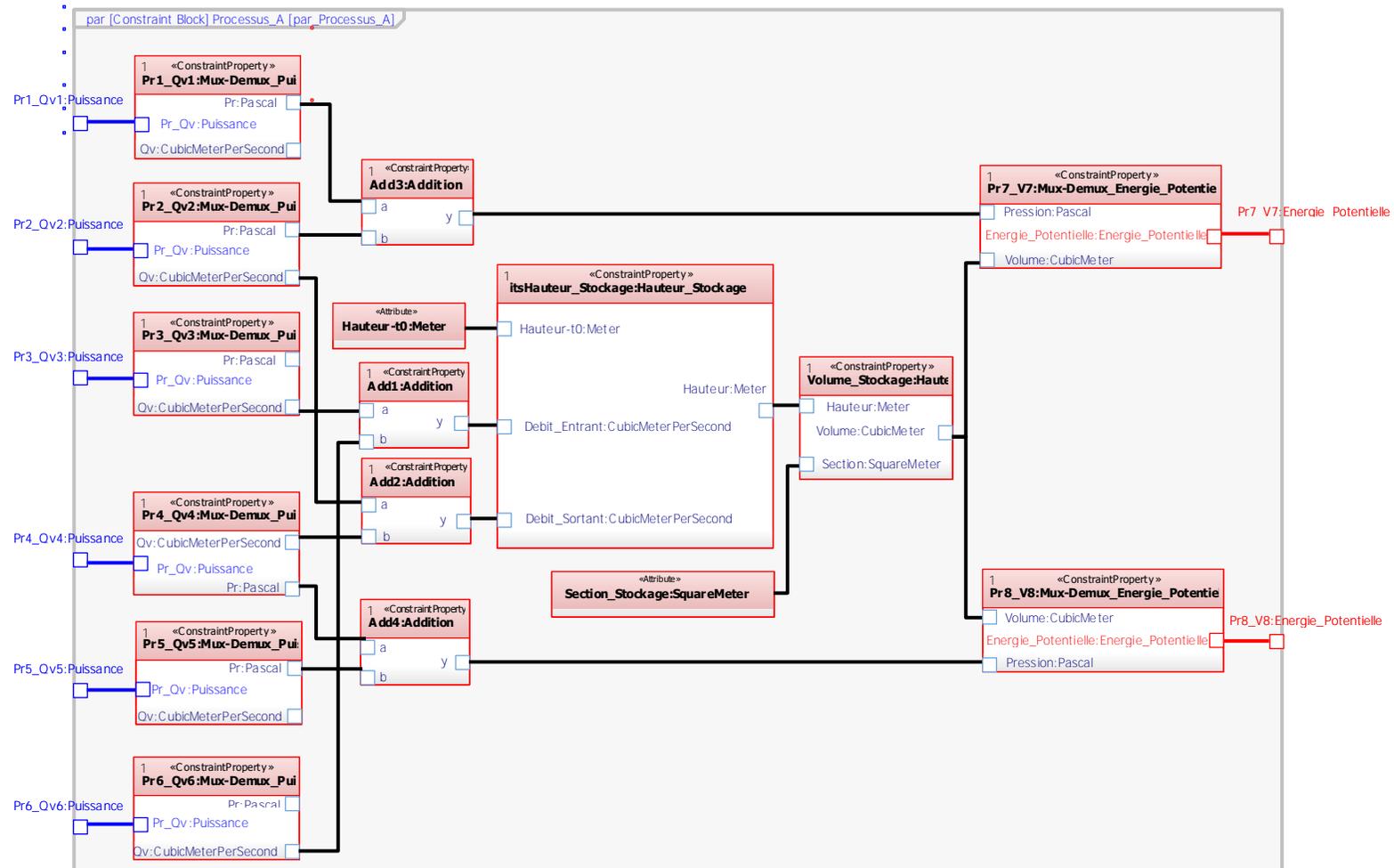


Figure 198 : Diagramme paramétrique (par) SysML – Dynamique processus A

Annexes

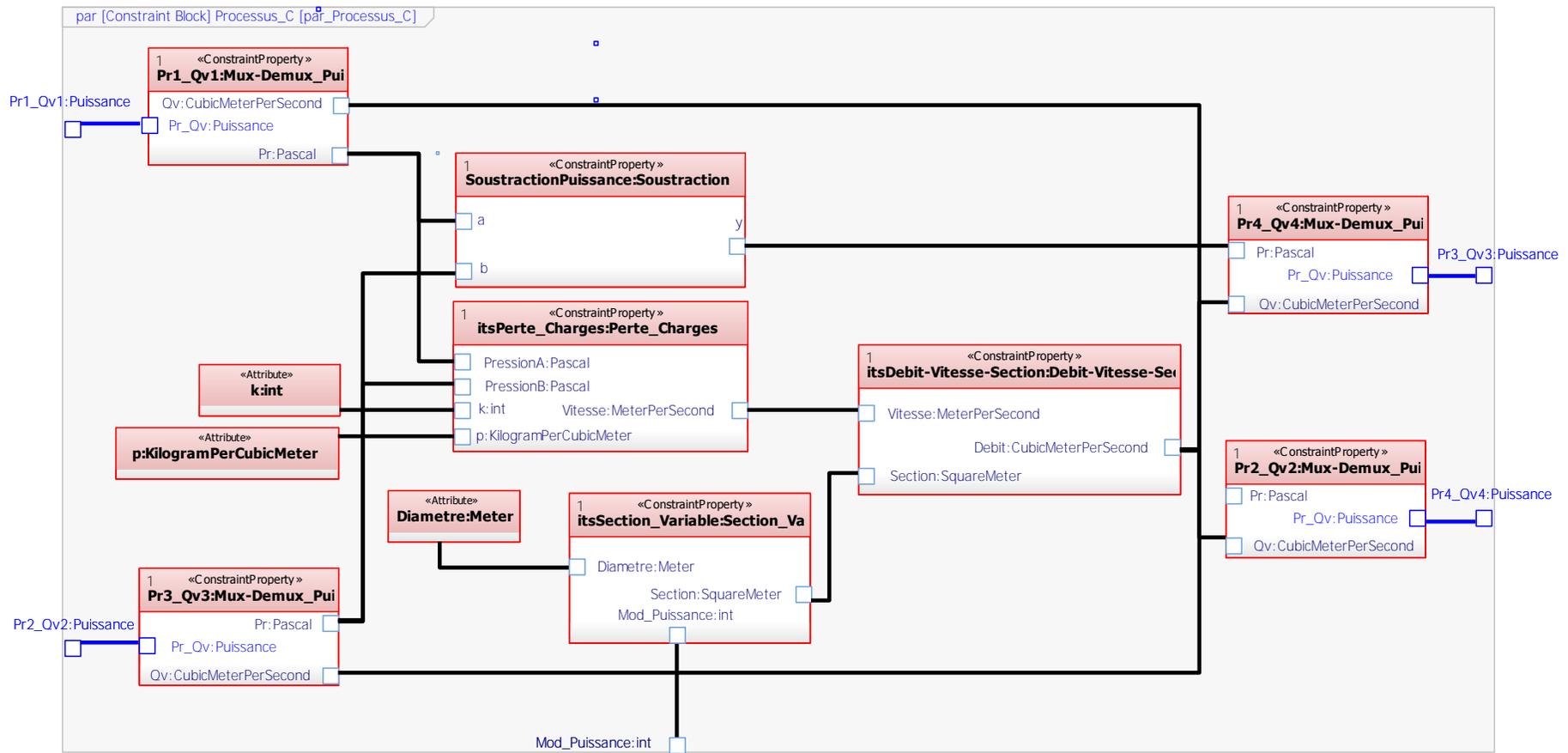


Figure 199 : Diagramme paramétrique (par) SysML – Dynamique processus C

Annexe 5-10 : Environnement de co-simulation pour la validation du modèle de la partie physique de la plate-forme CISPI

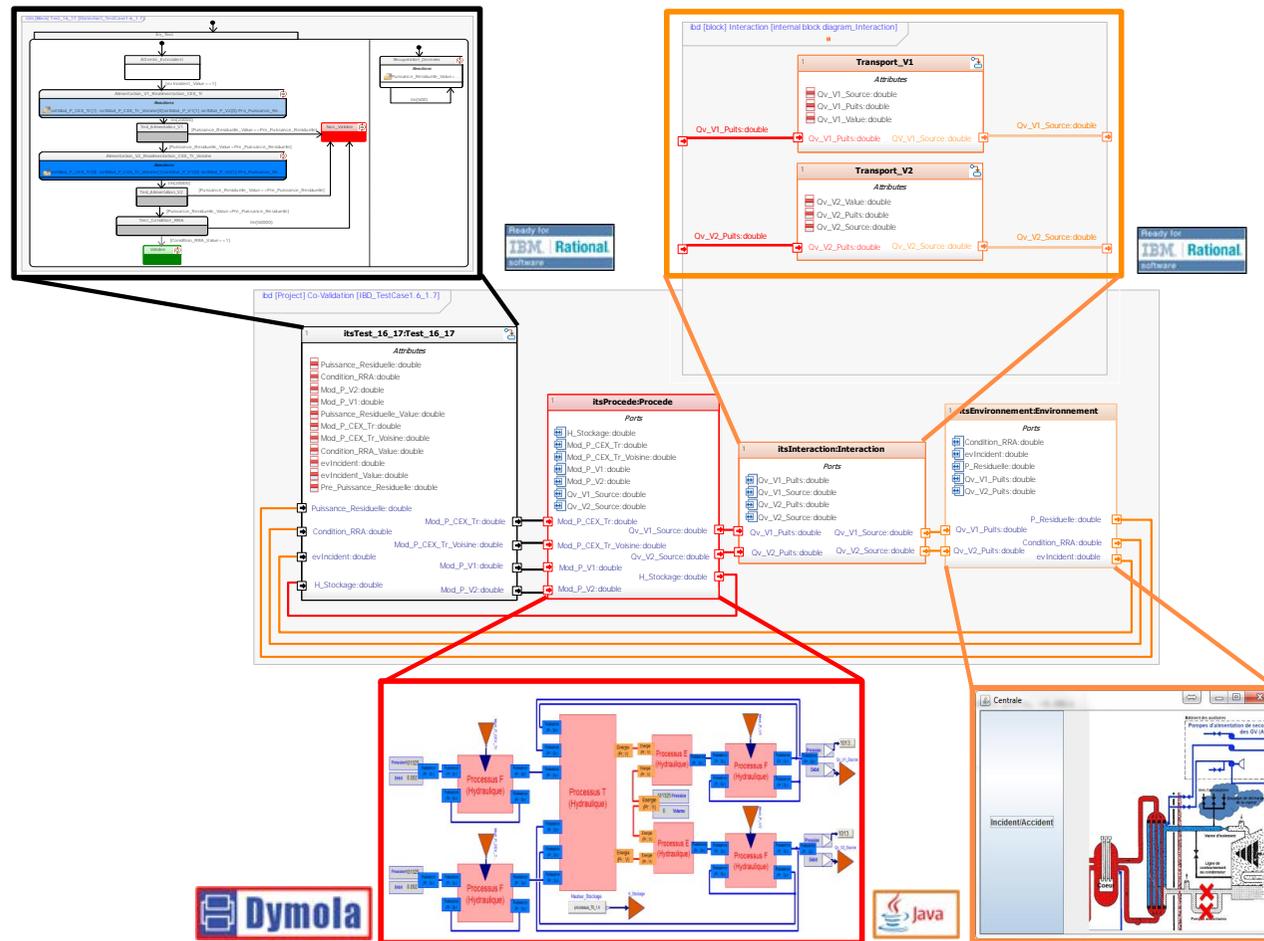


Figure 200 : Diagramme interne de blocs SysML : Architecture des modèles d'ingénierie spécialistes pour la validation du modèle de la partie physique de la plate-forme CISPI

Annexes

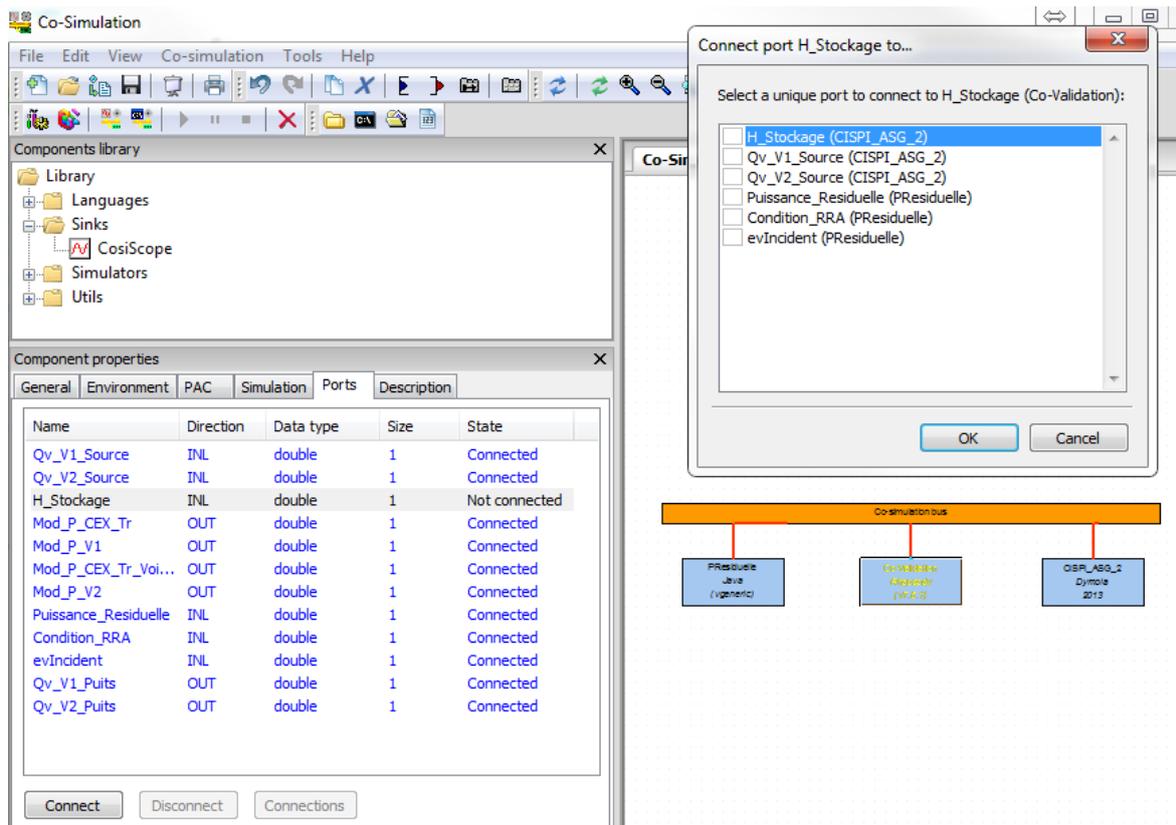


Figure 201 : Configuration de l'environnement de co-simulation pour la validation du modèle de la partie physique de la plate-forme CISPI : définition des interactions entre les modèles spécialistes au travers des ports de type "Cosimate" selon le diagramme interne de blocs (Figure 200).

Annexes

Annexe 6-1 : Environnement de co-simulation pour la validation du modèle de contrôle de la partie logique de la plate-forme CISPI

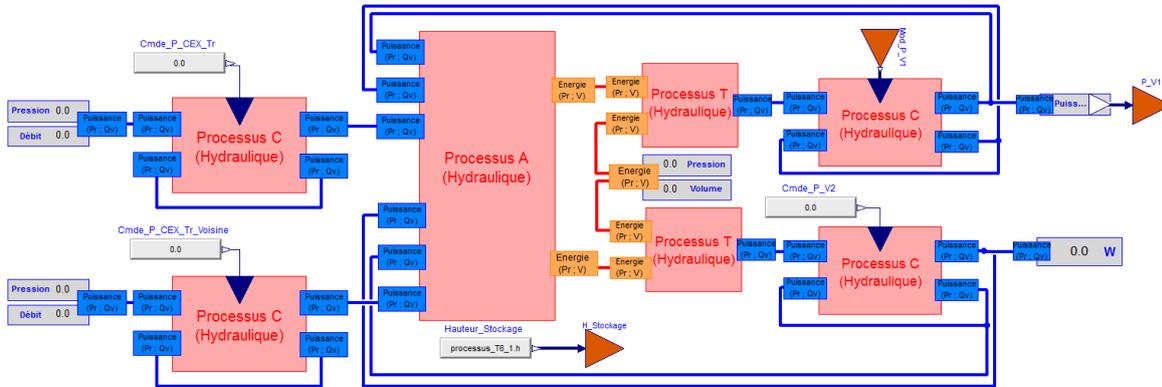


Figure 202 : Modèle du processus de la plate-forme CISPI avec des ports de type "Cosimate" pour la validation du modèle de contrôle de la partie-logique de la plate-forme CISPI

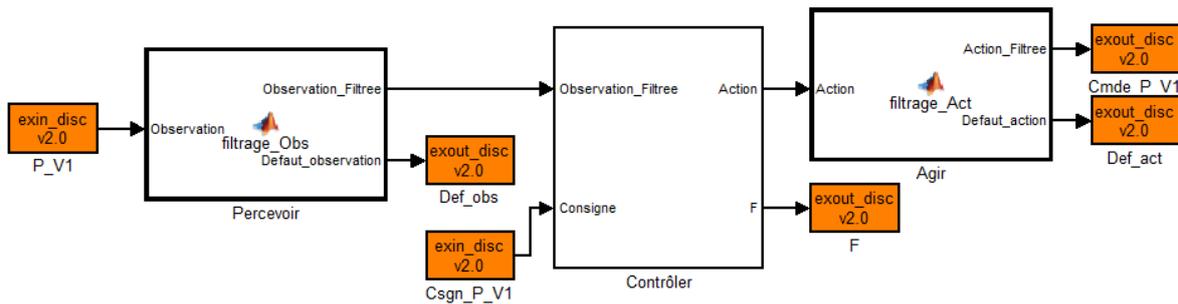


Figure 203 : Modèle de la partie contrôle de la plate-forme CISPI avec des ports de type "Cosimate"

Annexes

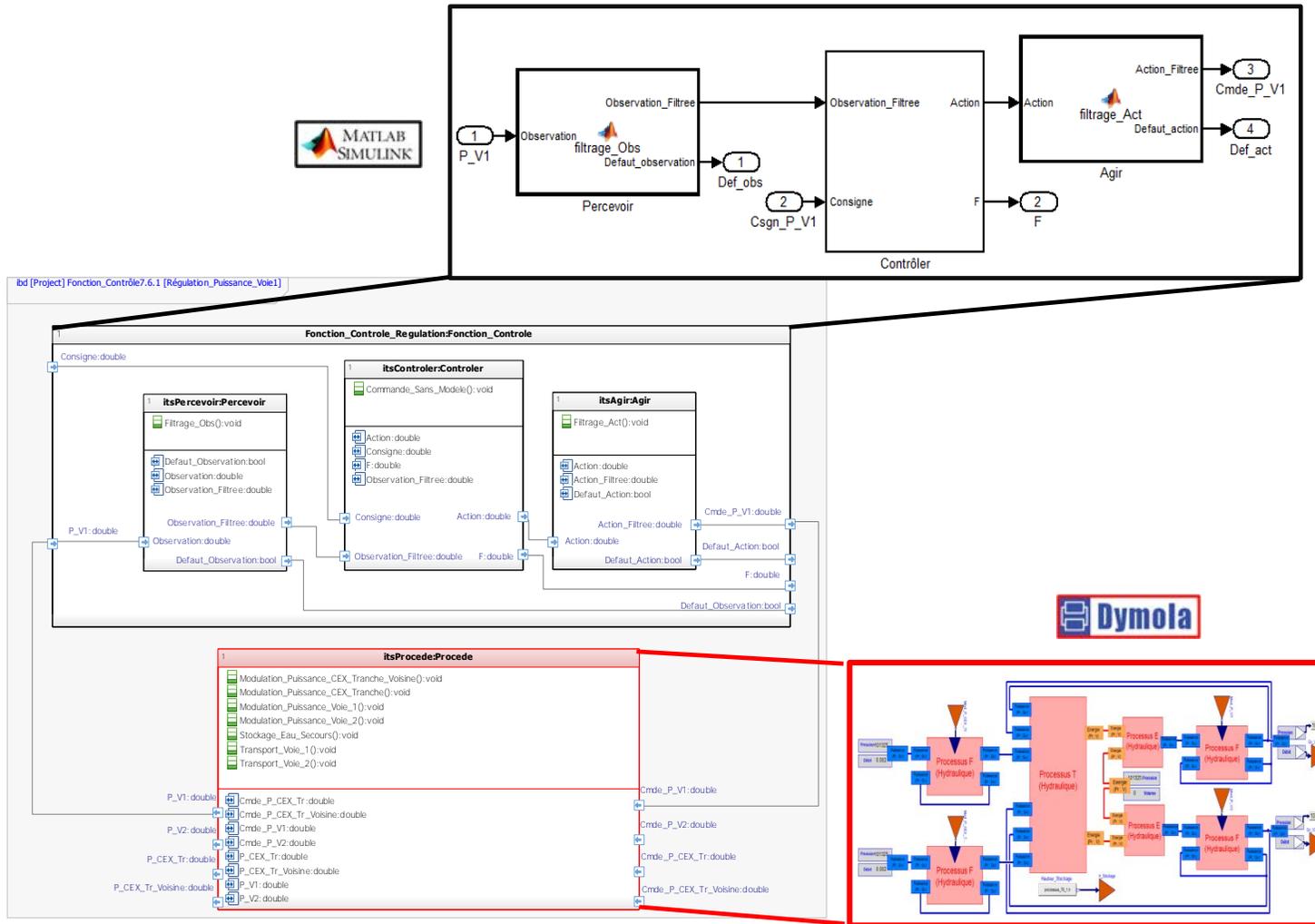


Figure 204 : Diagramme interne de blocs SysML : Architecture des modèles d'ingénierie spécialistes pour la validation du modèle de contrôle de la partie logique de la plate-forme CISPI

Annexes

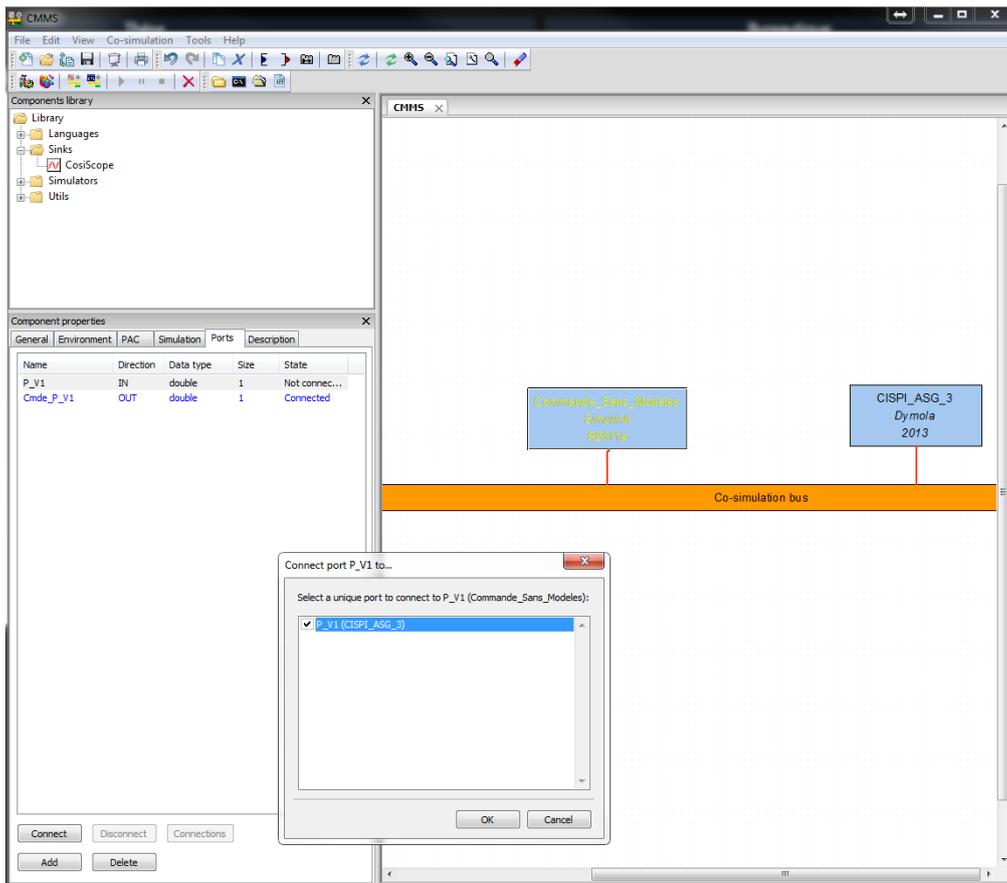


Figure 205 : Configuration de l'environnement de co-simulation pour la validation du modèle de contrôle de la partie logique de la plate-forme CISPI : définition des interactions entre les modèles spécialistes au travers des ports de type "Cosimate" selon le diagramme interne de blocs (Figure 204)

Annexe 6-2 : Modélisation du sous-système de commande

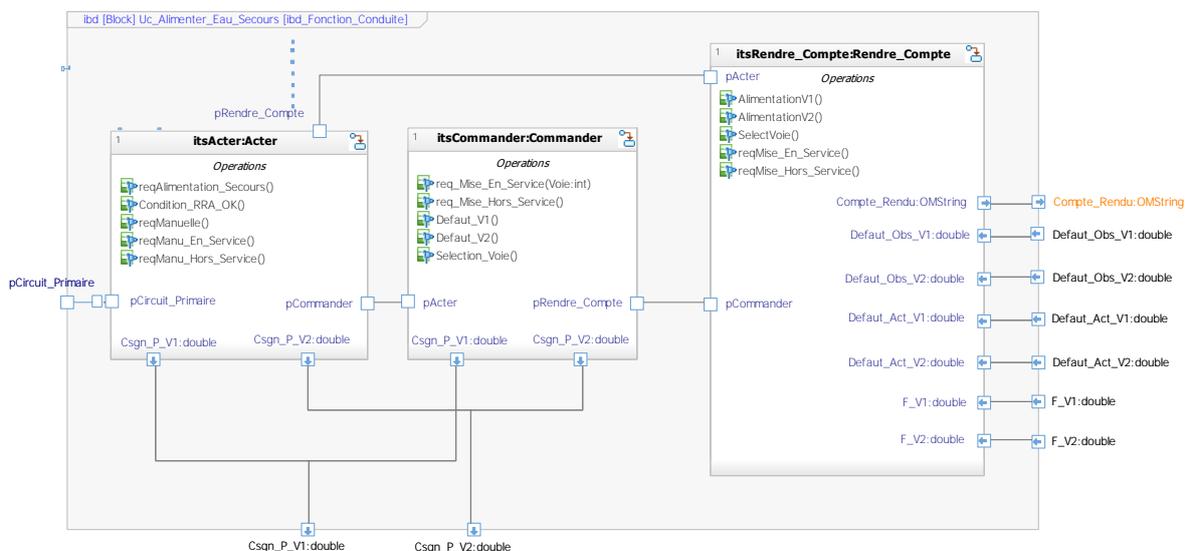


Figure 206 : Structure interne du modèle de commande

Annexe 6-3 : Environnement de co-simulation pour la validation du sous-système de commande de la partie logique de la plate-forme CISPI

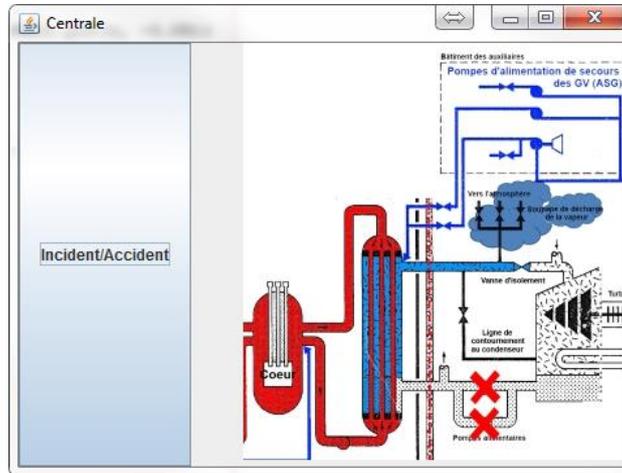


Figure 207 : Modèle de l'environnement de la plate-forme CISPI (circuit primaire) pour la validation du modèle de commande

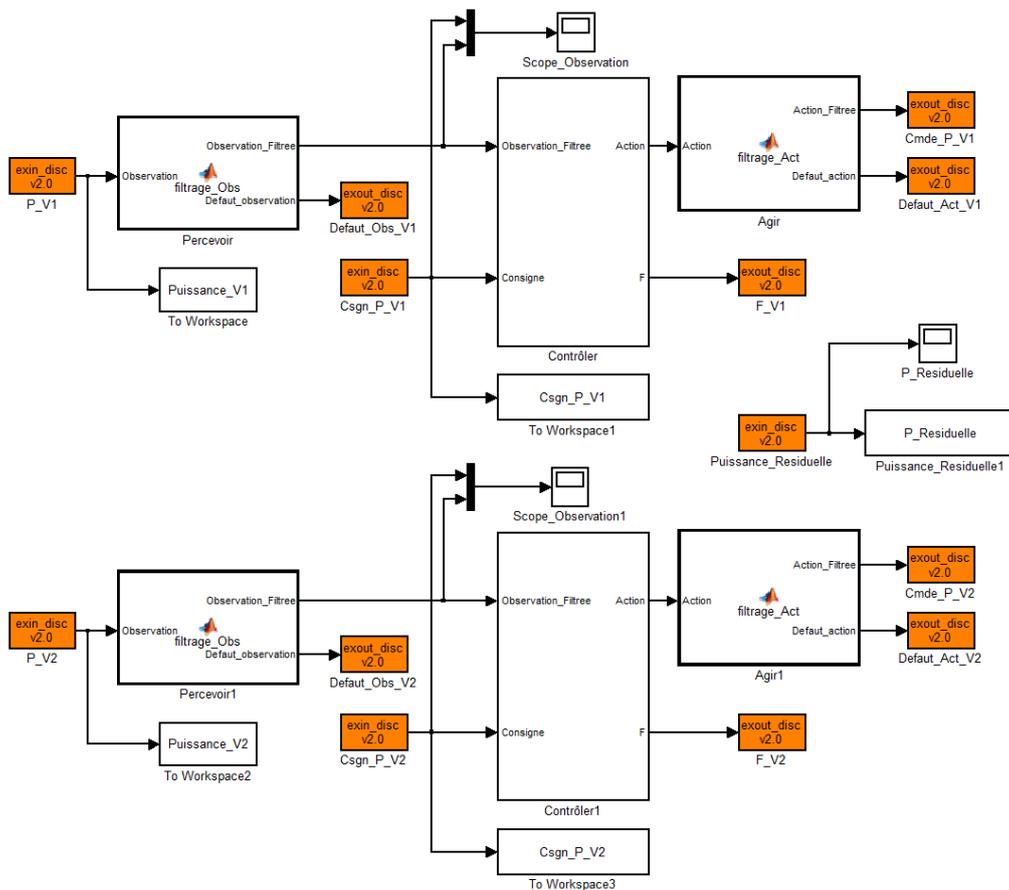


Figure 208 : Modèle de la partie contrôle de la plate-forme CISPI avec des ports de type "Cosimate" pour la validation du modèle de commande

Annexes

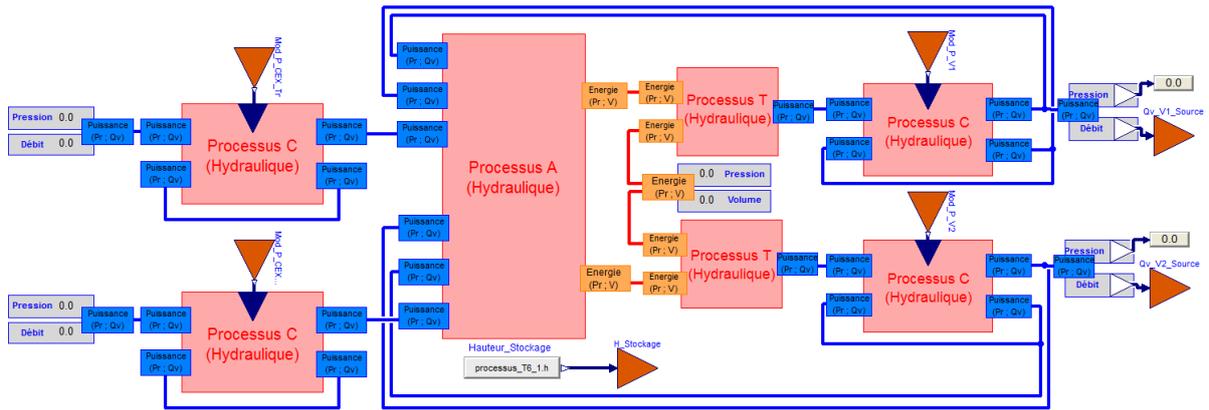


Figure 209 : Modèle du processus de la plate-forme CISPI avec des ports de type "Cosimate" pour la validation du modèle de commande

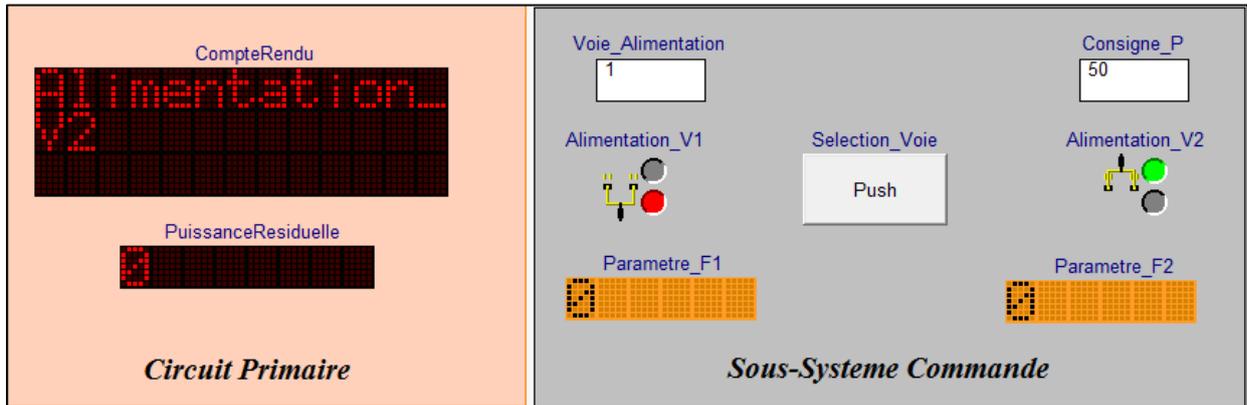


Figure 210 : Panel Diagram - Interface de supervision avec les modèles de commande et des acteurs

Annexes

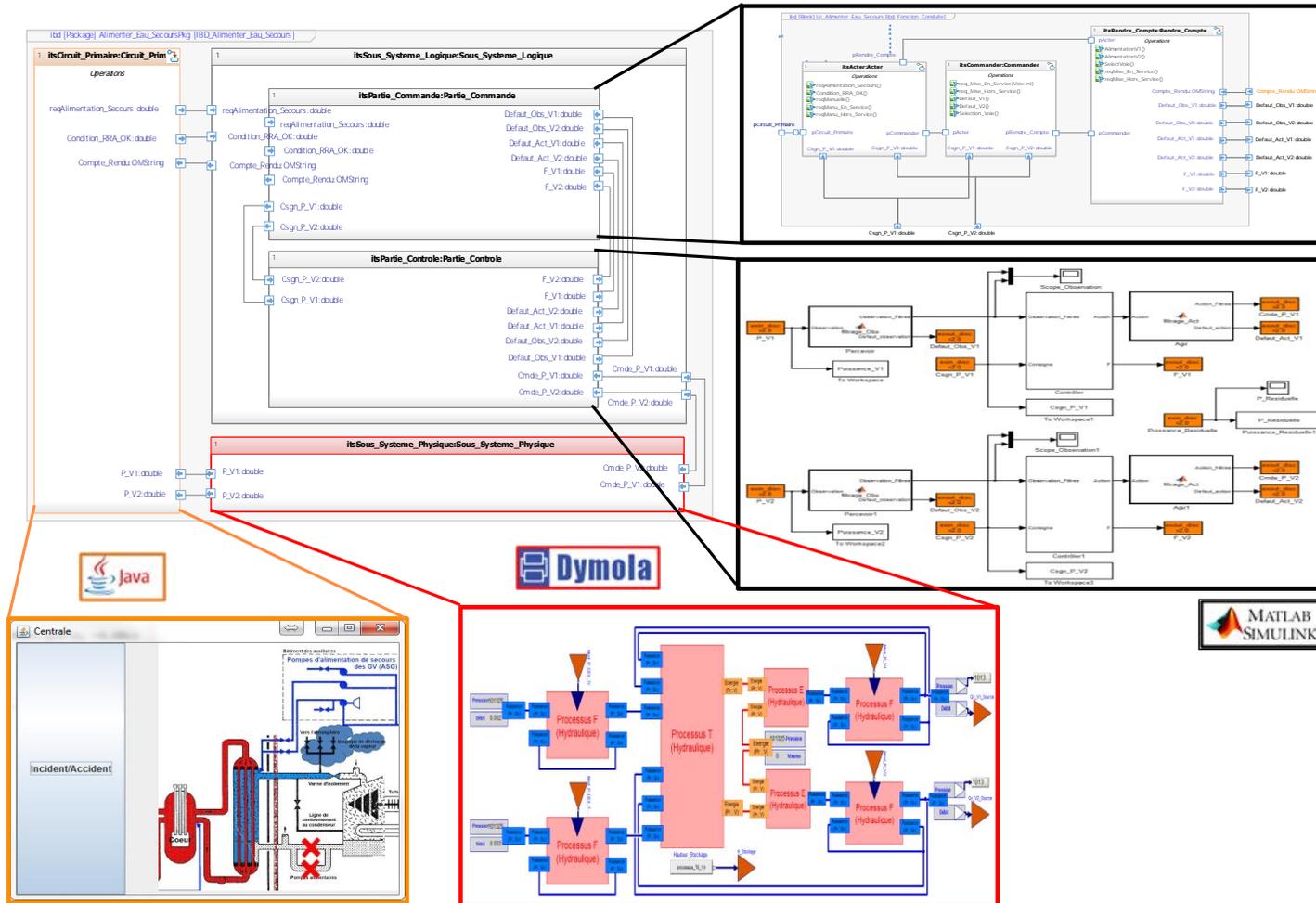
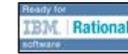


Figure 211 : Diagramme interne de blocs SysML : Architecture des modèles d'ingénierie spécialistes pour la validation du modèle de commande de la partie logique de la plate-forme CISPI

Annexes

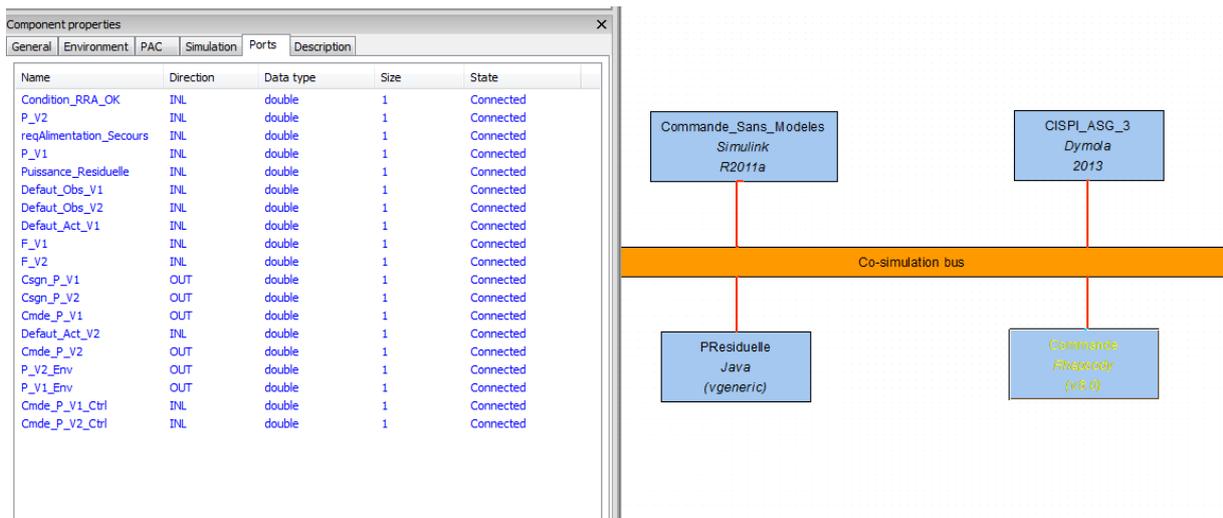


Figure 212 : Configuration de l'environnement de co-simulation pour la validation du modèle de commande de la partie logique de la plate-forme CISPI : définition des interactions entre les modèles spécialistes au travers des ports de type "Cosimate" selon le diagramme interne de blocs (Figure 204)

Annexe 7-1 : Analyse des exigences systèmes par l'espace solution fournisseur d'actionneur intelligent

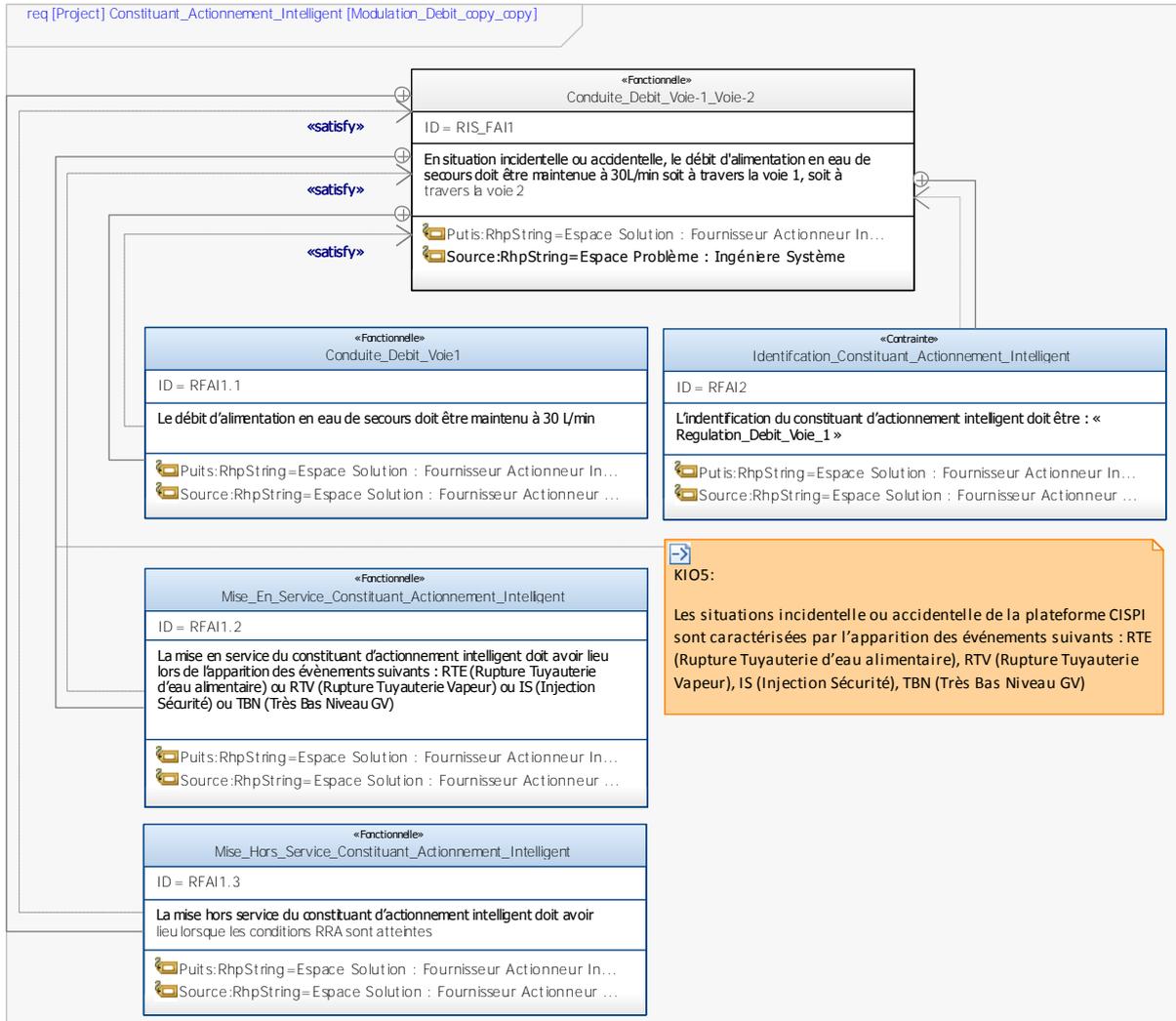


Figure 213 : Diagramme d'exigences (req) SysML - Raffinement de l'exigence système « R_{IS_FAI1} » par l'espace-solution fournisseur d'actionneur intelligent

Annexes

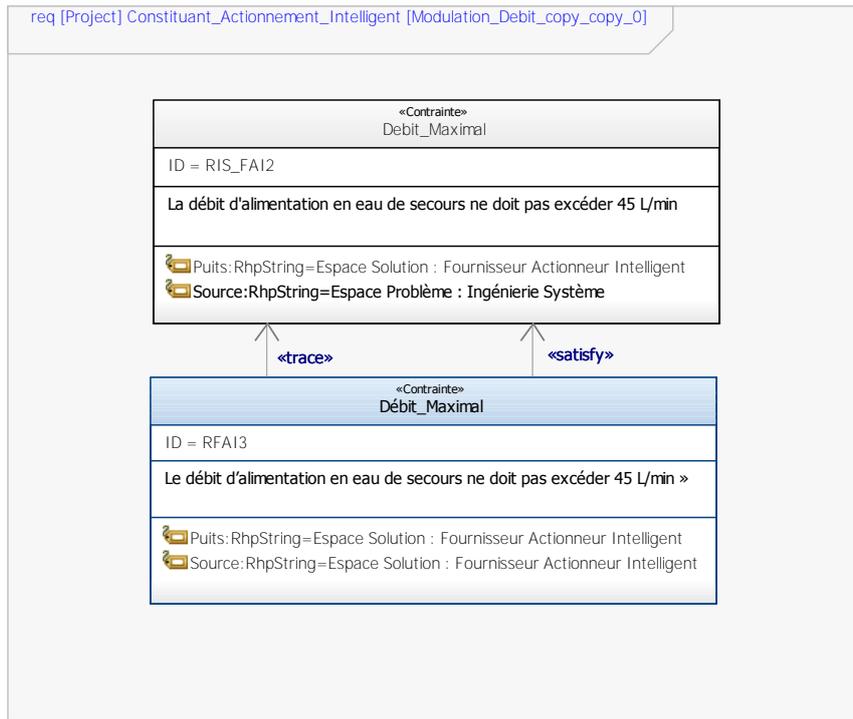


Figure 214 : Diagramme d'exigences (req) SysML - Raffinement de l'exigence système « R_{IS_FAI2} » par l'espace-solution fournisseur d'actionneur intelligent

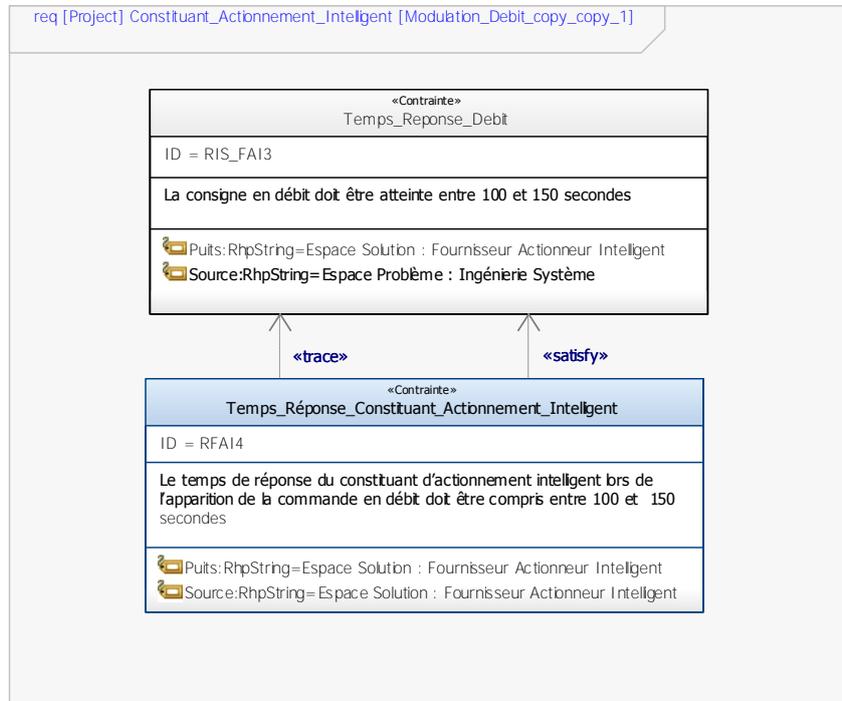


Figure 215 : Diagramme d'exigences (req) SysML - Raffinement de l'exigence système « R_{IS_FAI3} » par l'espace-solution fournisseur d'actionneur intelligent

Annexes

Annexe 7-2 : Spécification du constituant d'actionnement intelligent de modulation de débit

<pre>function [rDefaultActionner,rP_V1,obQv_V1] = fcn(obP_V1,rQv_V1,rDefault) %#codegen PrAtm = 101325; %Pression Atmosphérique en Pascal obQv_V1 = obP_V1/PrAtm*60000; % Objectif Debit (L/min) rP_V1= rQv_V1*PrAtm/60000; % Rapport Puissance(W) rDefaultActionner = rDefault;</pre>	<pre>function [Default_Act_V1,obvQv_V1] = Acter(obQv_V1) %#codegen Debit_Min = 0; Debit_Max = 50; % Test Valeur Objectif Debit if ((obQv_V1 < Debit_Min) (obQv_V1 > Debit_Max)) Default_Act_V1 = true; obvQv_V1 = 0; else Default_Act_V1 = false; obvQv_V1 = obQv_V1; end</pre>	<pre>function [ObvQv_V1, Default_Obs_V1] = filtrage_Obs(ObQv_V1) %#codegen Debit_Min = 0; Debit_Max = 75; if (ObQv_V1 < Debit_Min) (ObQv_V1 > Debit_Max) ObvQv_V1 = 0; Default_Obs_V1 = true; else ObvQv_V1 = ObQv_V1; Default_Obs_V1 = false; end</pre>
Interaction Logico-Technologique	Acter	Percevoir
<pre>function [Default_Ag_V1,Action_Pos_V1] = Agir(Pos_V1) %#codegen Pos_Max = 1; Pos_Min = 0; if (Pos_V1 <= Pos_Min) (Pos_V1 >= Pos_Max) Action_Pos_V1 = 0; Default_Ag_V1 = true; else Action_Pos_V1 = Pos_V1; Default_Ag_V1 = false; end</pre>	<pre>function [rDefault,rQv_v1] = Rendre_Compte(Default_Act_V1,Default_Ag_V1,ObsQv_V1,Default_Obs_V1) %#codegen if ((Default_Act_V1 == true)&&(Default_Ag_V1 == false)&&(Default_Ag_V1 == false)) rDefault= 1 %'Default Acter - Erreur Action:Position'; rQv_v1=0; end if ((Default_Ag_V1 == true)&&(Default_Act_V1 == false)&&(Default_Ag_V1 == false)) rDefault= 2 %'Default Agir - Erreur Objectif:Debit'; rQv_v1=0; end if (Default_Obs_V1 == true)&&((Default_Act_V1 == false)&&(Default_Ag_V1 == false)) rDefault= 3 %'Default Percevoir - Erreur Observation:Debit'; rQv_v1=0; end if ((Default_Act_V1 == false) (Default_Ag_V1 == false) (Default_Ag_V1 == false)) rDefault= 0 %'Pas de Default - Regulation Puissance OK'; rQv_v1=ObsQv_V1; end</pre>	
Agir	Rendre-Compte	Actionner

Tableau 24 : Spécification du comportement des blocs : « Interaction Logico-Technologique », « Acter », « Percevoir », « Agir », « Rendre-Compte » et « Actionner » composant le constituant d'actionnement intelligent de modulation de débit

Annexe 7-3 : Environnement de co-simulation pour la vérification de la spécification (S_{FAI}) du constituant d'actionnement intelligent

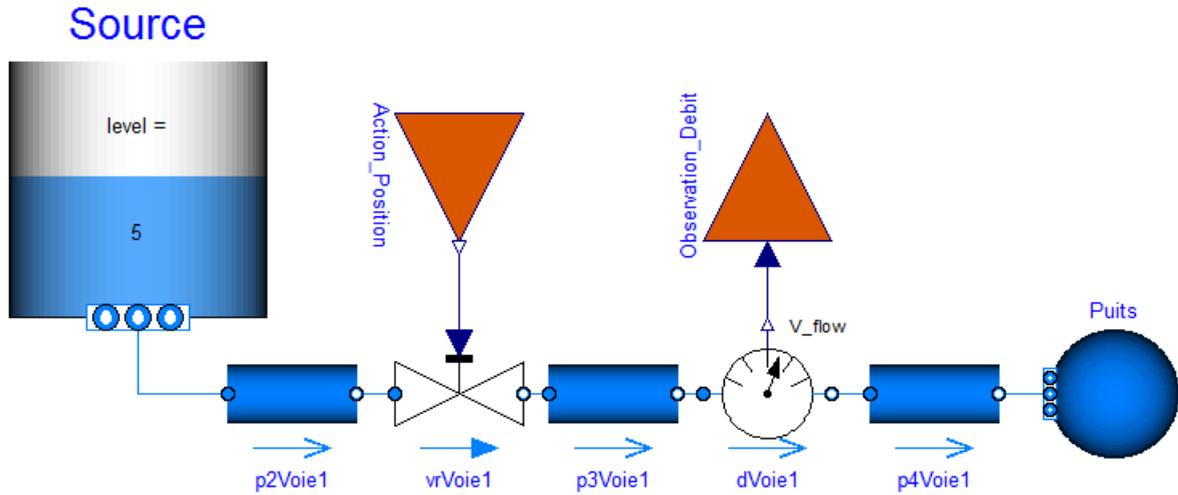


Figure 216 : Modèle Modelica de la partie technique du constituant d'actionnement intelligent pour la vérification de la spécification (S_{FAI}) du constituant d'actionnement intelligent

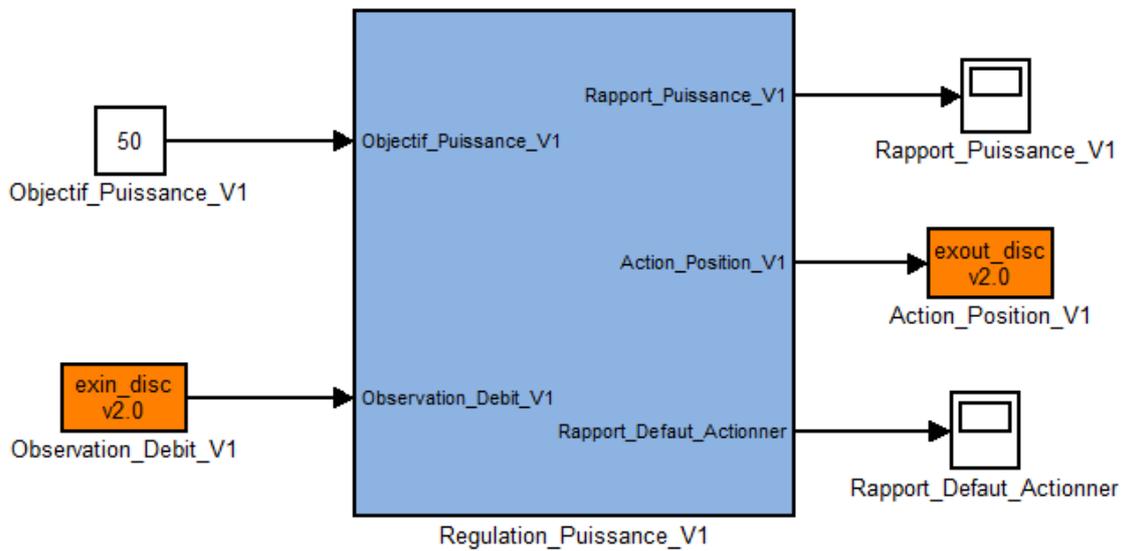


Figure 217 : Modèle Simulink de la partie logique du constituant d'actionnement intelligent pour la vérification de la spécification (S_{FAI}) du constituant d'actionnement intelligent

Annexes

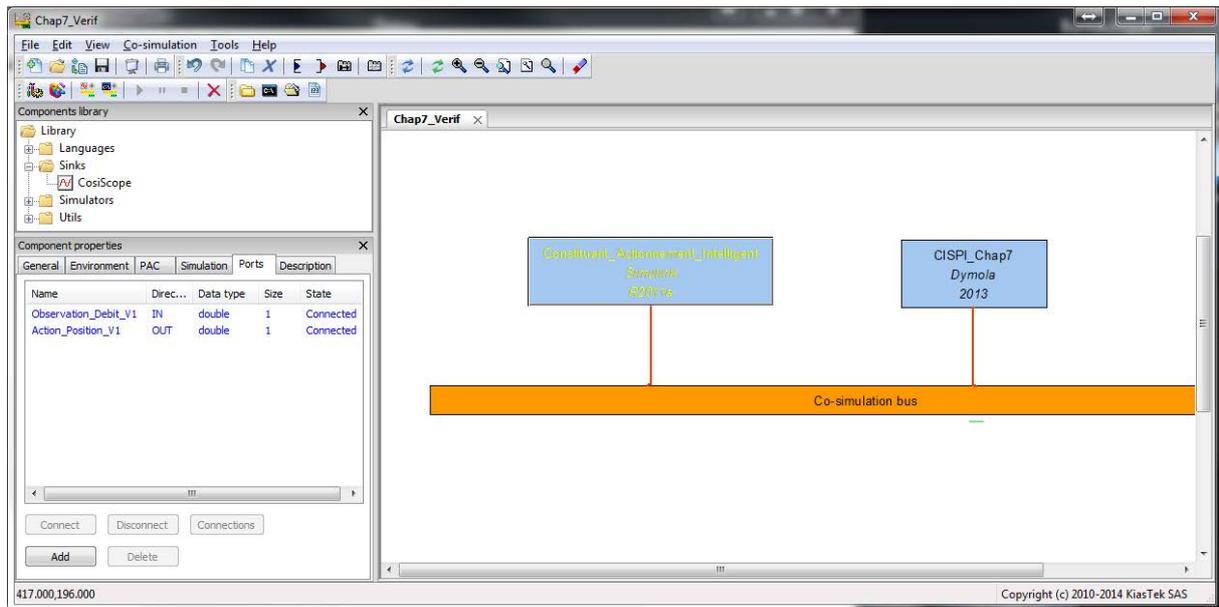


Figure 218 : Configuration de l'environnement de co-simulation pour la vérification du modèle du constituant d'actionnement intelligent de modulation de débit

Annexe 7-4 : Environnement de co-simulation pour la validation de la spécification (S_{FAI}) du constituant d'actionnement intelligent

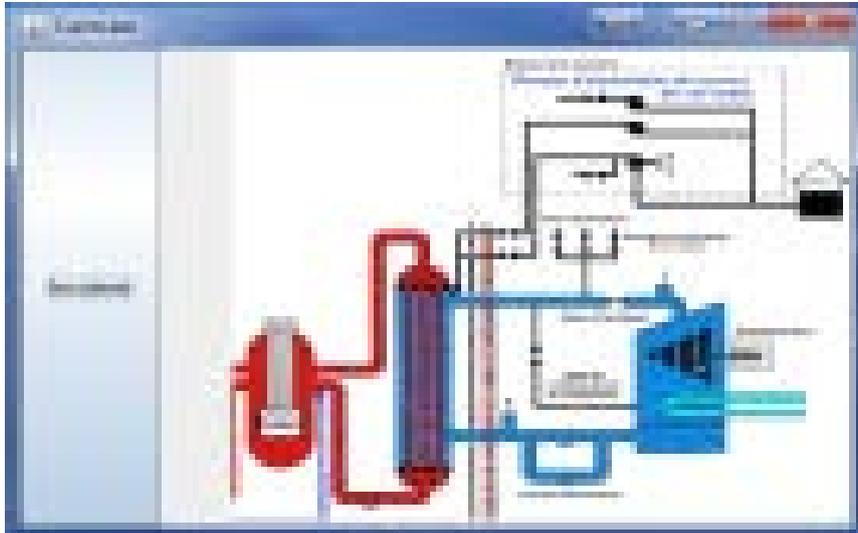


Figure 219 : Modèle de l'environnement de la plate-forme CISPI (circuit primaire) pour la validation du modèle du constituant d'actionnement intelligent de modulation de débit

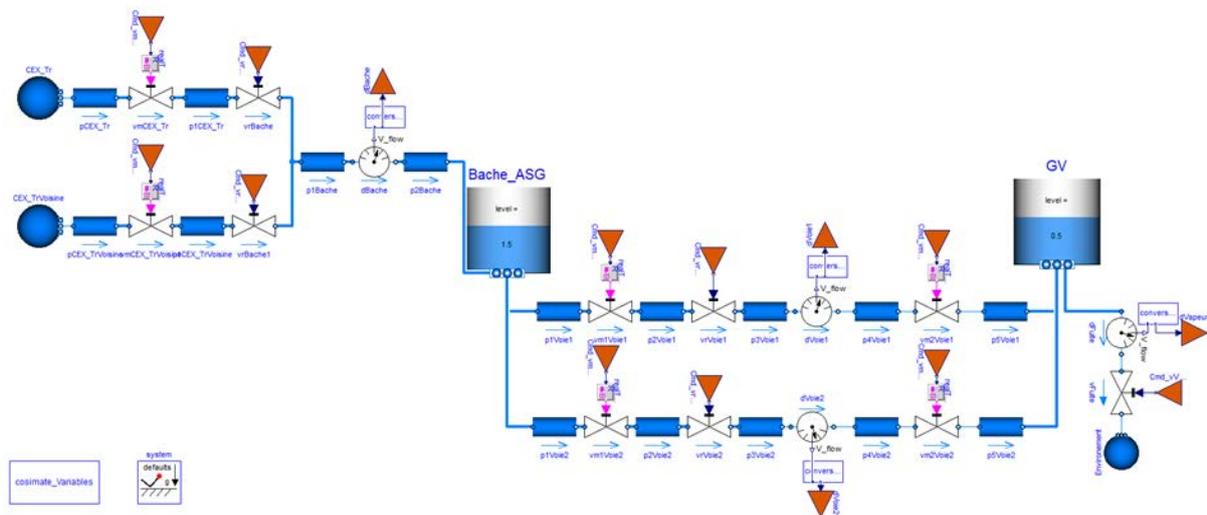


Figure 220 : Modèle du sous-système physique de la plate-forme CISPI (incluant la partie technique du constituant d'actionnement intelligent) avec des ports de type "Cosimate" pour la validation du modèle du constituant d'actionnement intelligent de modulation de débit

Annexes

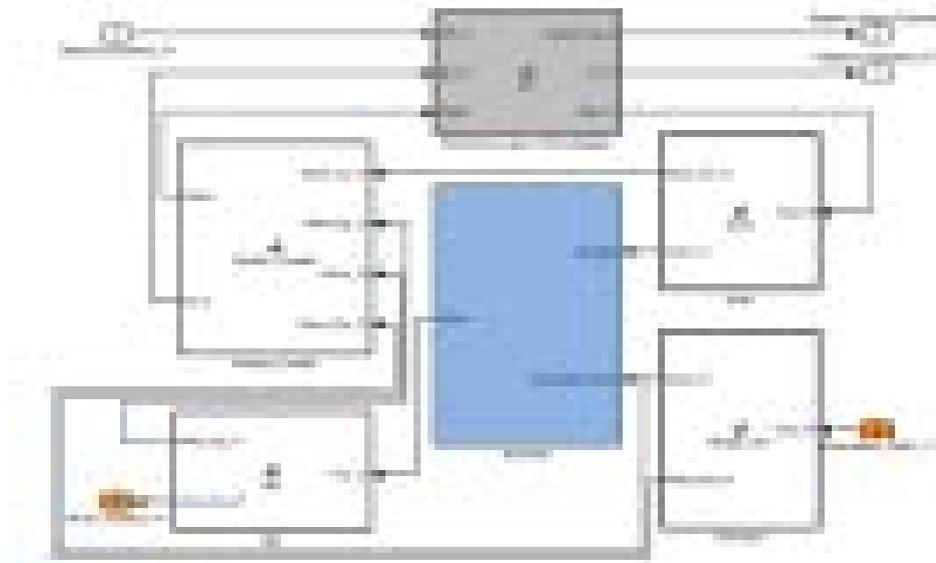


Figure 221 : Modèle de la partie logique du constituant d'actionnement intelligent pour la validation du modèle du constituant d'actionnement intelligent de modulation de débit

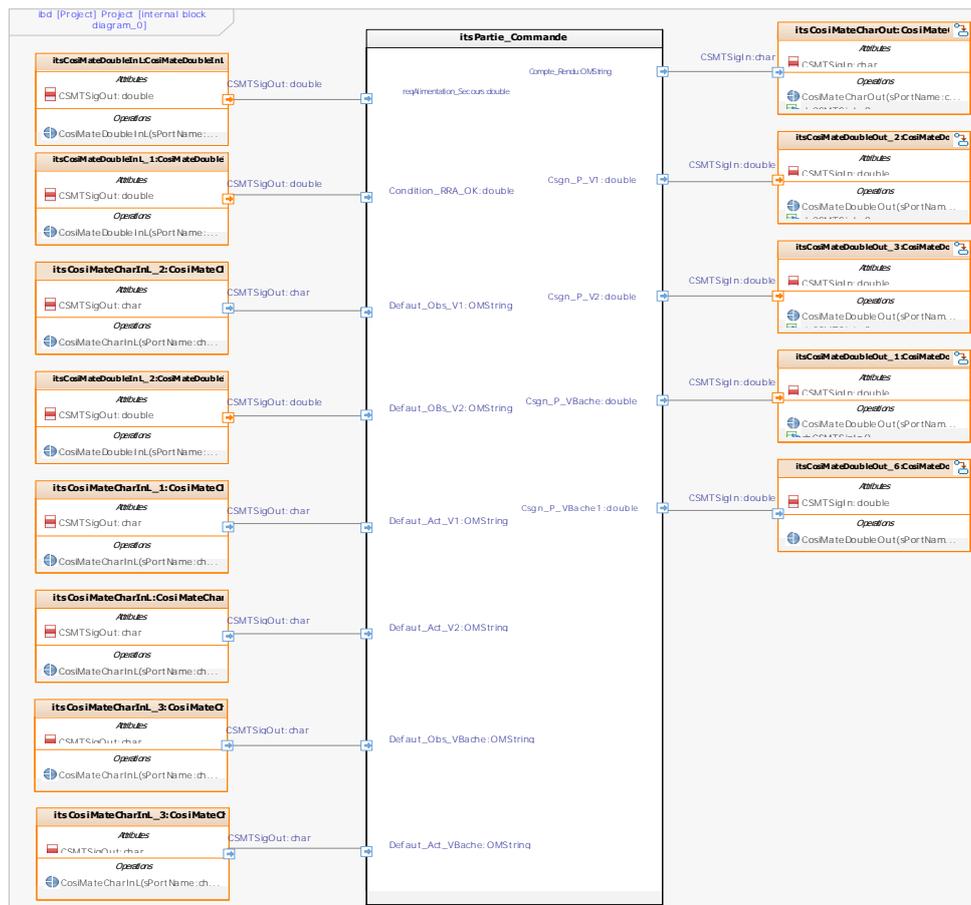


Figure 222 : Modèle de la partie commande du sous-système logique de la plate-forme CISPI avec des ports de type "Cosimate" pour la validation du modèle du constituant d'actionnement intelligent de modulation de débit

Annexes

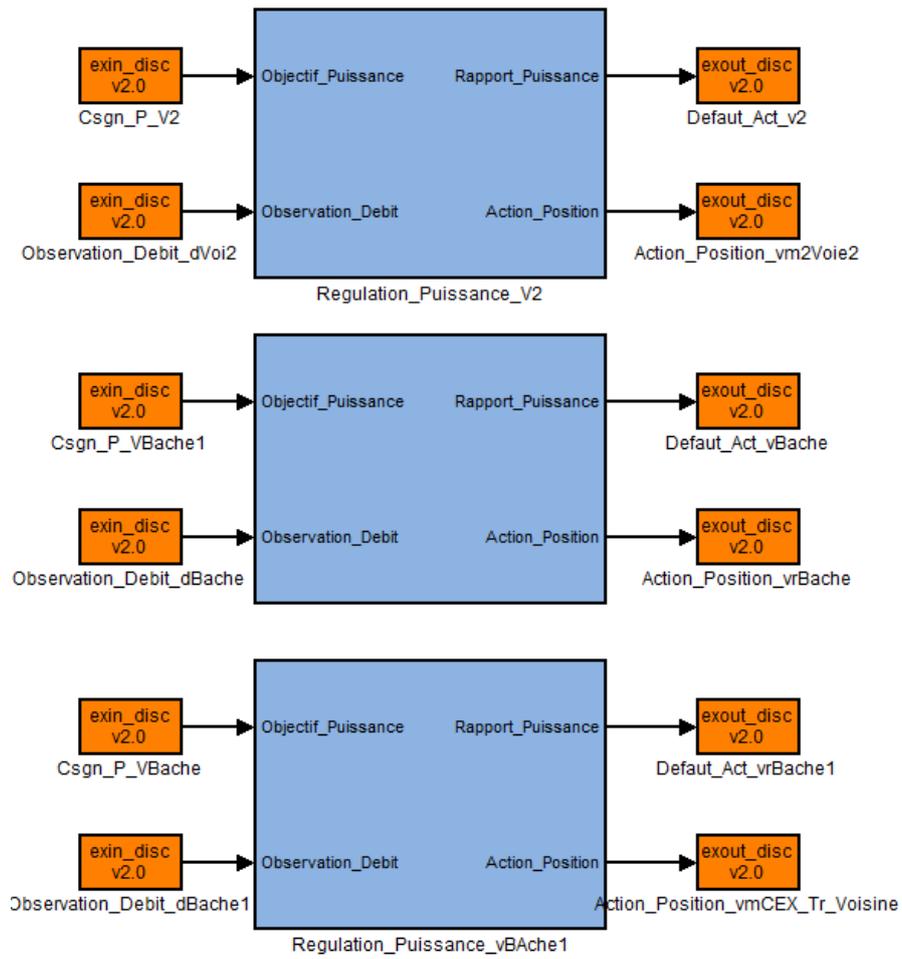


Figure 223 : Modèle de la partie contrôle du sous-système logique de la plate-forme CISPI avec des ports de type "Cosimate" pour la validation du modèle du constituant d'actionnement intelligent de modulation de débit

Annexes

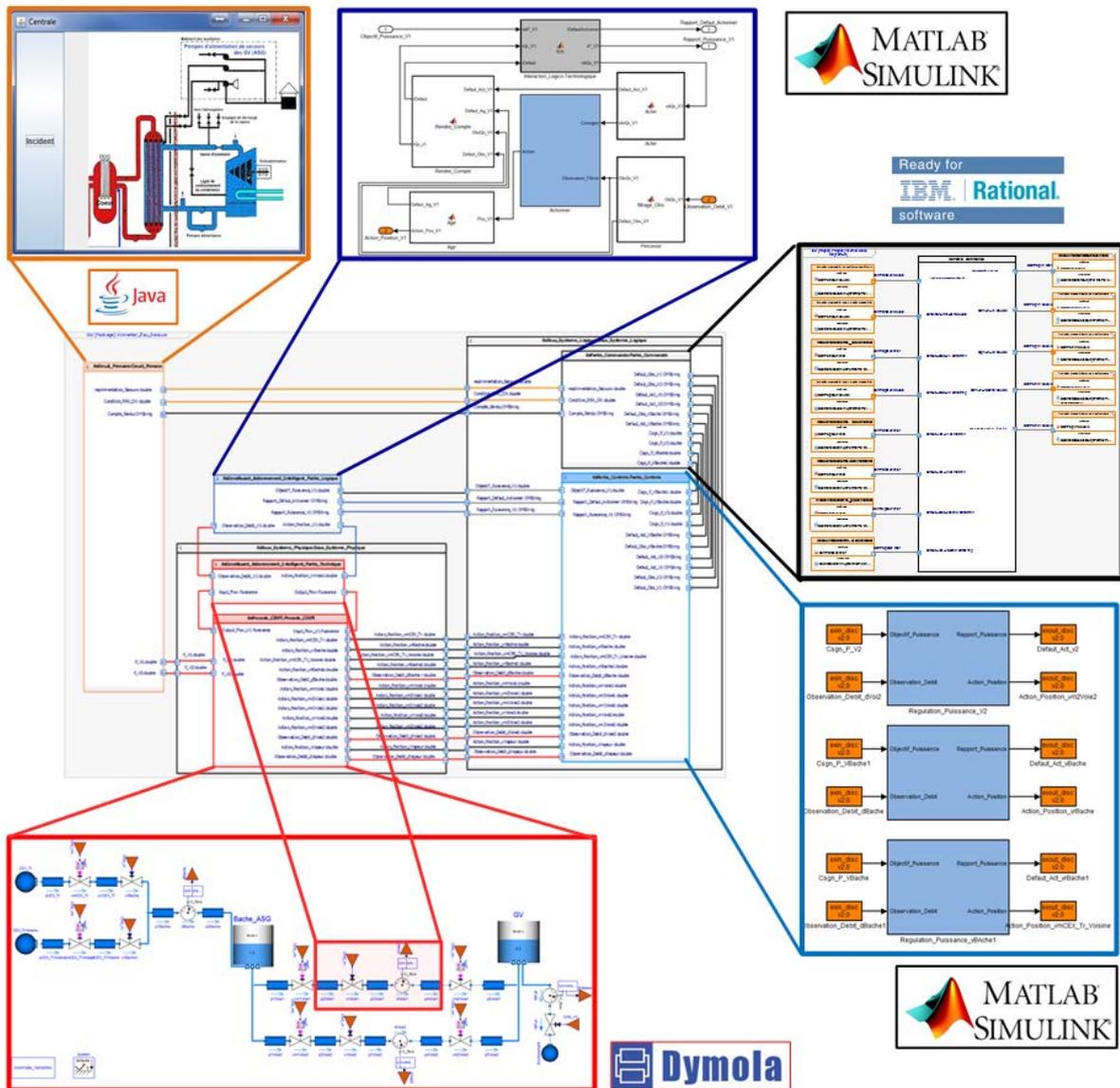


Figure 224 : Diagramme interne de blocs SysML : Architecture des modèles d'ingénierie spécialistes pour la validation du modèle du constituant d'actionnement intelligent de modulation de débit

Annexes

Annexe 7-5 : Module de couplage Serveur OPC / Bus de co-simulation (Cosimate)

```
import com.cosimate.coupling.java.*;
import java.io.IOException;
import java.net.UnknownHostException;
import java.util.concurrent.ScheduledThreadPoolExecutor;
import java.util.logging.Level;
import java.util.logging.LogManager;
import java.util.logging.Logger;
import org.openscada.opc.lib.common.ConnectionInformation;
import org.openscada.opc.lib.da.Server;
import org.jinterop.dcom.common.JIException;
import org.jinterop.dcom.core.JIVariant;
import org.openscada.opc.lib.common.AlreadyConnectedException;
import org.openscada.opc.lib.common.NotConnectedException;
import org.openscada.opc.lib.da.AddFailedException;
import org.openscada.opc.lib.da.DuplicateGroupException;
import org.openscada.opc.lib.da.Group;
import org.openscada.opc.lib.da.Item;
import org.openscada.opc.lib.da.ItemState;
import org.openscada.opc.lib.da.ServerConnectionStateListener;

/**
 * @author Remi PANNEQUIN
 *         Fabien BOUFFARON
 */
public class Station1 {

    public enum ConnectionState {disconnected, connected,};
    static final String user = "cispi";
    static final String pwd = "cispi";
    static final String ip = "193.50.39.229";//"10.100.2.1";
    static final String clsid = "B6EACB30-42D5-11d0-9517-0020AF4A4B3C";
    static final String GROUP_NAME = "CosiMate";
    static final String ITEM_NAME_MEASURE = "Automate Centrale.CPU.DB_Com.S1_debit_mesure";
    static final String ITEM_NAME_SETPPOINT = "Automate Centrale.CPU.DB_Com.S1_ordre_debit";

    private static ConnectionState connect = ConnectionState.disconnected;
    private static Item item_measure, item_setpoint;

    private static void initOPC() {
        try {
            ConnectionInformation connectionInformation = new ConnectionInformation(user, pwd);
            connectionInformation.setHost(ip);
            connectionInformation.setClsid(clsid);

            final Server s = new Server(connectionInformation, new ScheduledThreadPoolExecutor(10));
            s.addStateListener(new ServerConnectionStateListener() {

                @Override
                public void connectionStateChanged(boolean c) {
                    if (c) {
                        try {
                            connect = ConnectionState.connected;
                            Group group = s.addGroup(GROUP_NAME);
                            item_measure = group.addItem(ITEM_NAME_MEASURE);
                            item_setpoint = group.addItem(ITEM_NAME_SETPPOINT);
                        } catch (UnknownHostException ex) {
                            Logger.getLogger(Station1.class.getName()).log(Level.SEVERE, null, ex);
                        } catch (DuplicateGroupException ex) {
                            Logger.getLogger(Station1.class.getName()).log(Level.SEVERE, null, ex);
                        } catch (AddFailedException ex) {
                            Logger.getLogger(Station1.class.getName()).log(Level.WARNING, "failed to add item " + s, ex);
                        } catch (NotConnectedException ex) {
                            Logger.getLogger(Station1.class.getName()).log(Level.SEVERE, null, ex);
                        } catch (IllegalArgumentException ex) {
                            Logger.getLogger(Station1.class.getName()).log(Level.SEVERE, null, ex);
                        } catch (JIException ex) {
                            Logger.getLogger(Station1.class.getName()).log(Level.SEVERE, null, ex);
                        }
                    }
                }
            });
        }
    }
}
```

Annexes

```
    }
    } else {
        connect = ConnectionState.disconnected;
    }
    });
    s.connect();
} catch (IllegalArgumentException ex) {
    Logger.getLogger(Station1.class.getName()).log(Level.SEVERE, null, ex);
} catch (UnknownHostException ex) {
    Logger.getLogger(Station1.class.getName()).log(Level.SEVERE, null, ex);
} catch (JException ex) {
    Logger.getLogger(Station1.class.getName()).log(Level.SEVERE, null, ex);
} catch (AlreadyConnectedException ex) {
    Logger.getLogger(Station1.class.getName()).log(Level.SEVERE, null, ex);
}
}

public static void main(String[] args) {
    initOPC();
    //wait for connection to OPC
    while (connect != ConnectionState.connected) {
        try {
            Thread.sleep(1000);
        } catch (InterruptedException ex) {
            Logger.getLogger(Station1.class.getName()).log(Level.SEVERE, null, ex);
        }
    }
    double dPort1;
    double dPort2=30;
    boolean kill = false;

    // CosiMate bus initialization
    CCSMTBus cBus = new CCSMTBus("CispiStation1", 1.0);

    // CosiMate ports declaration
    CCSMTDoubleOut cPort1 = new CCSMTDoubleOut("FlowRate1");
    CCSMTDoubleIn cPort2 = new CCSMTDoubleIn("FlowSetPoint1",dPort2);

    // Stop if the program is running out of the co-simulation environment
    cBus.StopOnStandAloneMode();

    // End of the initialization phase
    cBus.EndInit();

    // Computation loop

    while (!kill) {
        try {
            // Compute and send Port1
            ItemState state = item_measure.read(true);
            dPort1 = (Float) state.getValue().getObject();
            cPort1.SetData(dPort1);

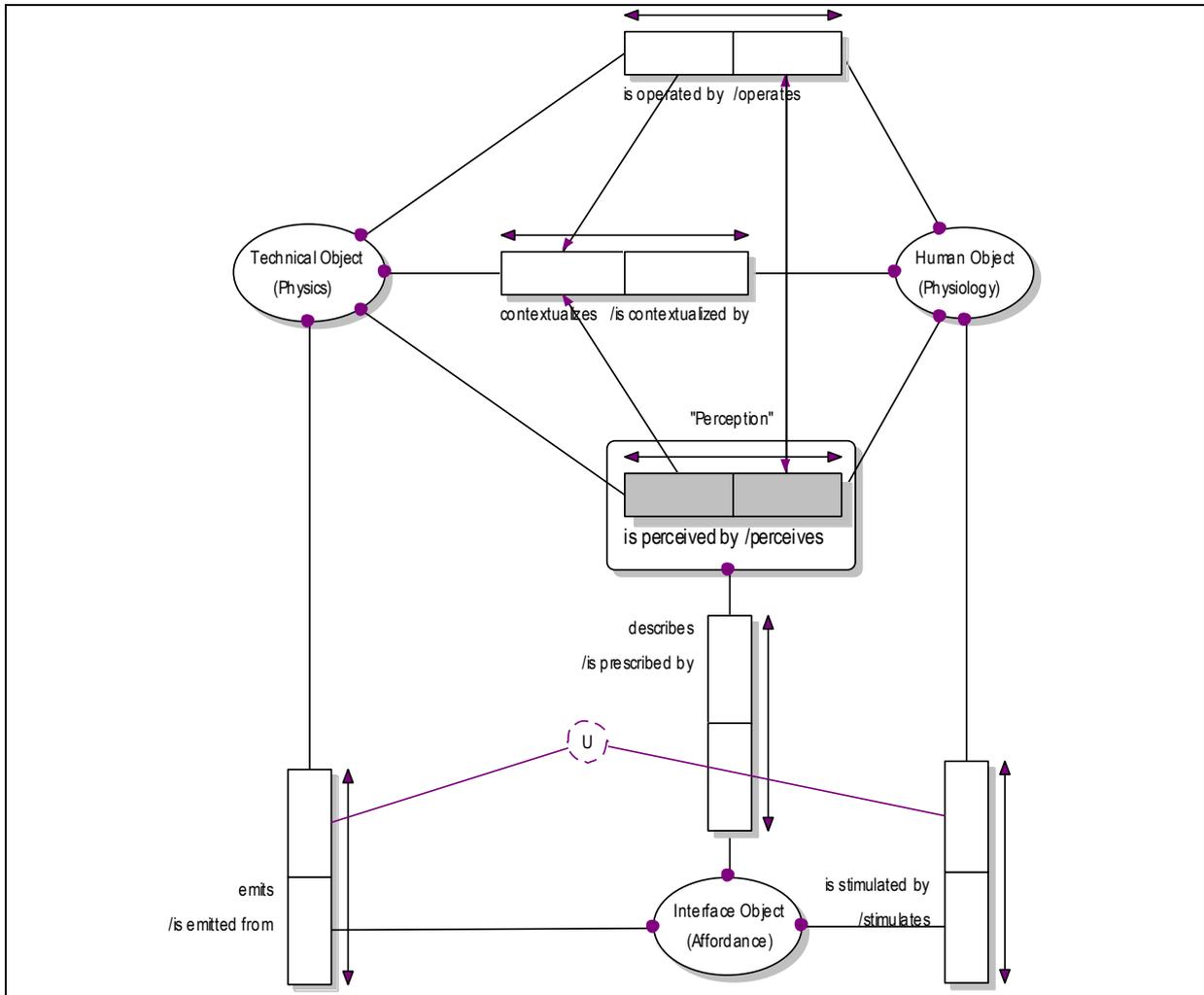
            // Synchronize
            int r = cBus.Synchronize(-1.0);

            switch (r) {
                case 0:
                case 1:
                    break;
                case 2:
                    System.out.println("Simulation stopped");
                    kill = true;
                    break;
                default:
                    System.out.println("Synchronization error");
                    kill = true;
            }
        }
    }
}
```

Annexes

```
    }  
  } catch (JException ex) {  
    Logger.getLogger(Station1.class.getName()).log(Level.SEVERE, null, ex);  
  }  
}  
// End of the co-simulation  
cBus.Stop();  
}  
}
```

Annexe 8-1 : Modèles NIAM-ORM d'une interaction Homme-Machine (Lieber, 2013)



(F1): It is possible that some Perception describes more than one Interface Object and that some Interface Object is prescribed by more than one Perception.

(F2): Every Interface Object is identified by one distinct Affordance.

(F3): It is possible that some Interface Object is emitted from more than one Technical Object and that some Technical Object emits more than one Interface Object.

(F4): It is possible that some Interface Object stimulates more than one Human Object and that some Human Object is stimulated by more than one Interface Object.

(F5) : For each Human Object (Field Operator) and Technical Object (Sound Alarm) there is at most one Interface Object that stimulates Human Object and is emitted from Technical Object
(Uniqueness_Constraint1)

Figure 225 : Modèle ORM de l'interaction de perception pour agir en contexte. L'objet interface affordant (F1 & F2) au centre de la relation de perception (F3 & F4) représente l'élément synergique entre objets hétérogènes techniques et humains (F5) qu'il faut arrivé à mesurer (Cette nécessité de mesure est représentée par l'affordance dans l'objet interface)

Annexes

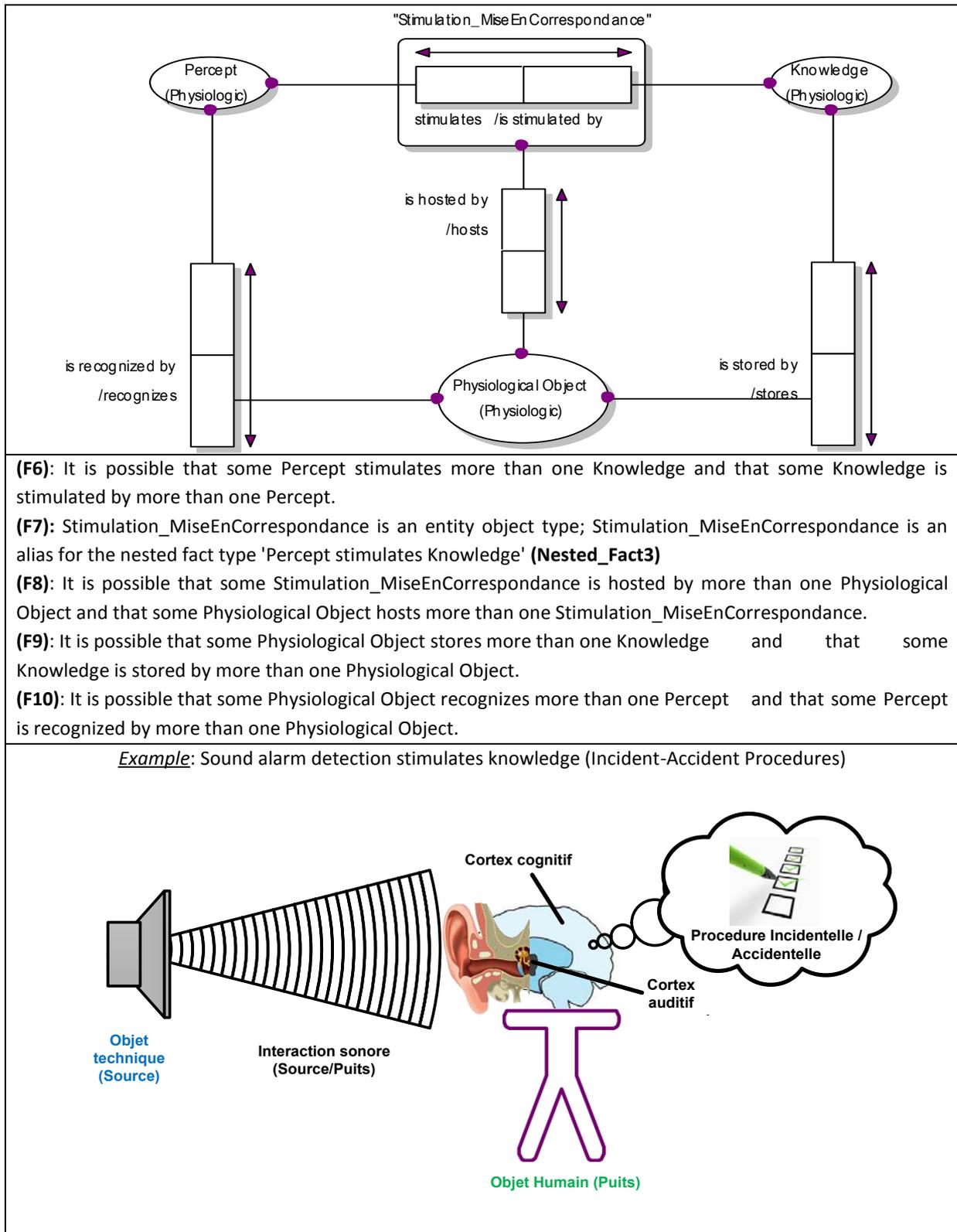


Figure 226 : Modèle ORM de l'interaction de détection sonore entre un objet technique et un opérateur humain, envisagée comme la mise en correspondance d'un percept, son de l'alarme, et d'une propriété cognitive ou connaissance de l'opérateur (Procédure incidentelle ou accidentelle)

Annexes

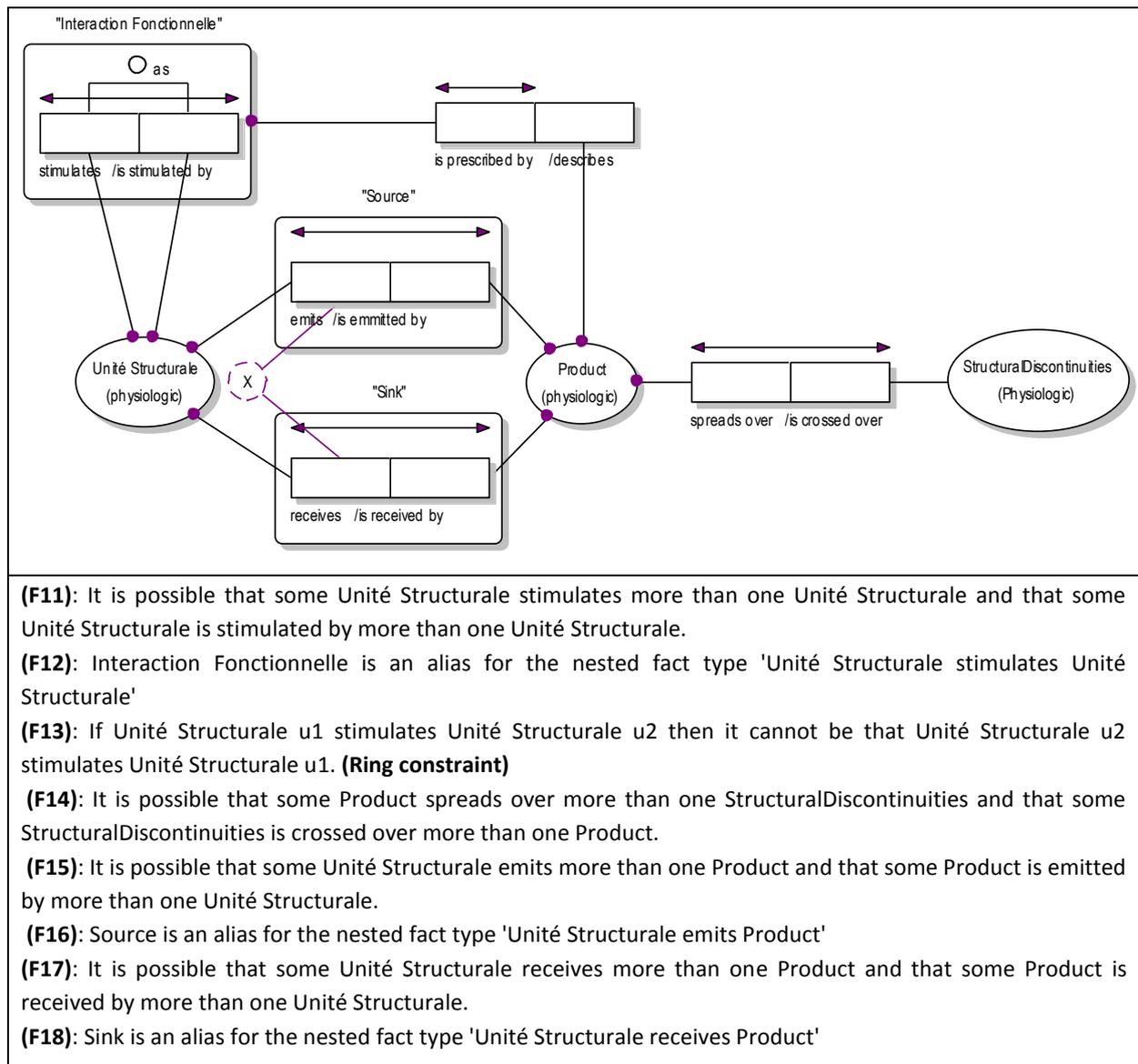


Figure 227 : Modèle ORM de l'atome élémentaire d'interaction fonctionnelle d'un processus physiologique. L'interaction fonctionnelle émerge de la relation de stimulation entre deux unités structurales et est prescrite in fine par le produit émis par la source u1 ou reçu par le puis u2 qui traverse des discontinuités structurales. De telles propriétés des mécanismes physiologiques conduisent à une structuration de l'organisme vivant en niveaux d'organisation hiérarchique et de ses unités structurales (architecture organique), ainsi que de ces processus physiologiques (architecture fonctionnelle)

Annexe 8-2 : Specification prescriptive d'exigences physiologiques

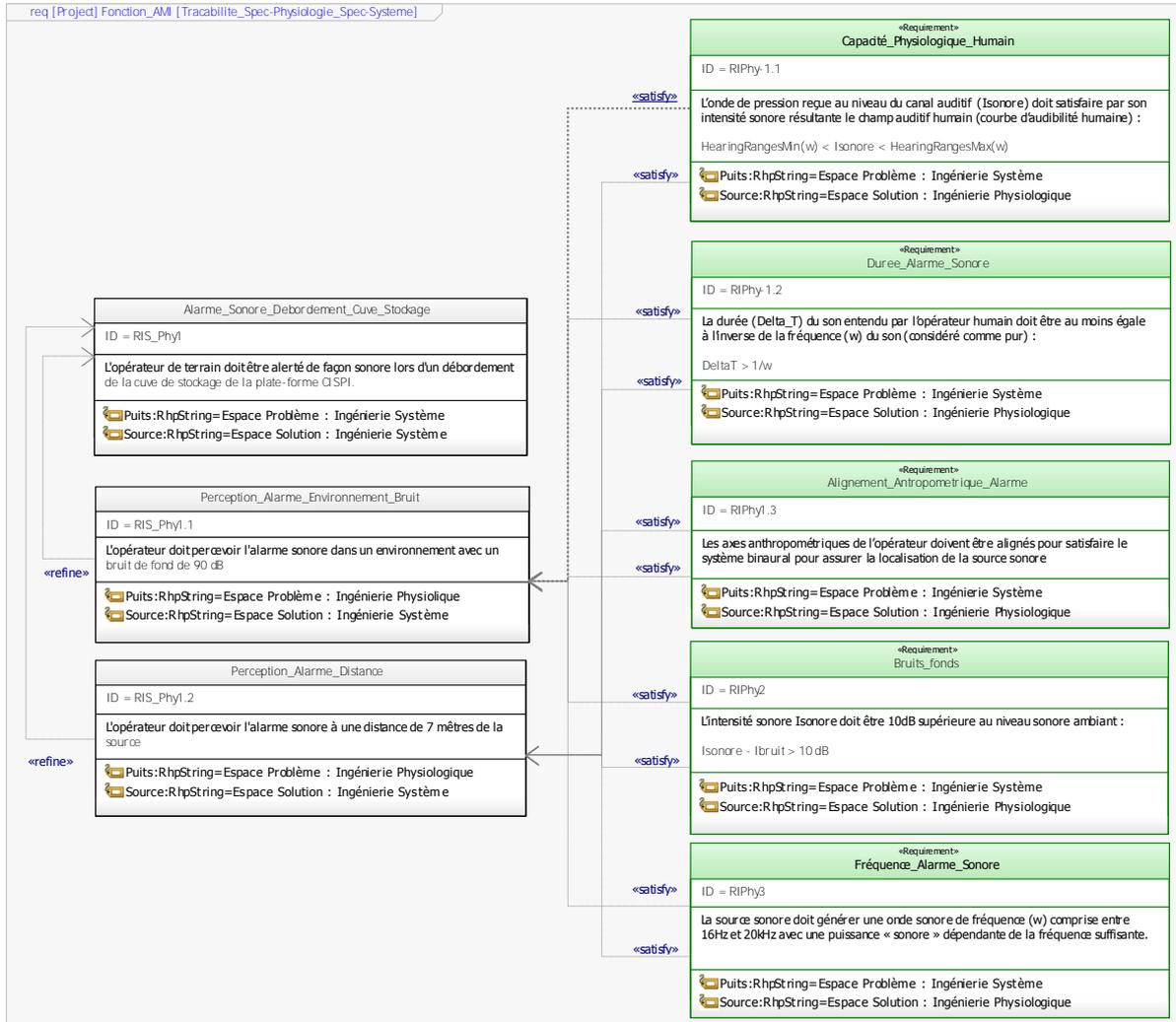


Figure 228 : Traçabilité entre exigences physiologiques (R_{IPhy}) et exigences systèmes (R_{IS})

Annexes

Annexe 8-3 : Modèle Simulink de l'interaction physico-physiologique de détection sonore

Fonction Perception (Agent humain de détection sonore)

```
function Perception =  
fcnPerception(Frequence_Sonore,Puissance_Physiologique,Bruit_Fonds)  
  
%#codegen  
ValueMax=1000;  
ValueMin=1000;  
Pa=10^(-5);  
  
if (Puissance_Physiologique == 0)  
    IdB = 0;  
else  
    IdB=10*log10(complex(Puissance_Physiologique/Pa^2))  
end  
  
coder.extrinsic('spline');  
  
Xfmin=[16;20;30;40;50;60;70;80;90;100;200;300;400;500;600;700;800;900;1000;  
2000;3000;4000;5000;6000;7000;8000;9000;10000;14000;15000;19000;20000];  
Ymin=[120;80;63;55;50;45;42;40;38;35;22;15;11;9;6;4;3;2;1;-5;-10;-  
9;0;3;8;10;12;12;15;20;40;70];  
  
ValueMin = spline(Xfmin,Ymin,Frequence_Sonore)  
  
Xfmax=[16;20;30;1000;2000;3000;4000;5000;7000;8000;14000;20000];  
Ymax=[120;127;130;130;122;115;112;115;120;122;110;70];  
  
ValueMax = spline(Xfmax,Ymax,Frequence_Sonore)  
  
if (ValueMin<IdB<ValueMax) && (IdB-Bruit_Fonds>10)  
    Perception=1;  
else  
    Perception=0;  
end
```

Fonction Amplitude (Interaction fonctionnelle)

```
function Amplitude = fcnAmplitude(Puissance_Source,X_Source,  
Y_Source,rho,c, X_Puits, Y_Puits)  
%#codegen  
  
Distance = sqrt ((X_Puits-X_Source)^2 + (Y_Puits-Y_Source)^2); %# Calcul de  
la distance entre le Puits et la source  
  
Amplitude = (rho*c*Puissance_Source)/(4*pi*Distance*Distance);
```

Annexe 8-4 : Environnement de co-simulation pour la validation du sous-système d'interaction de détection sonore de la plate-forme CISPI

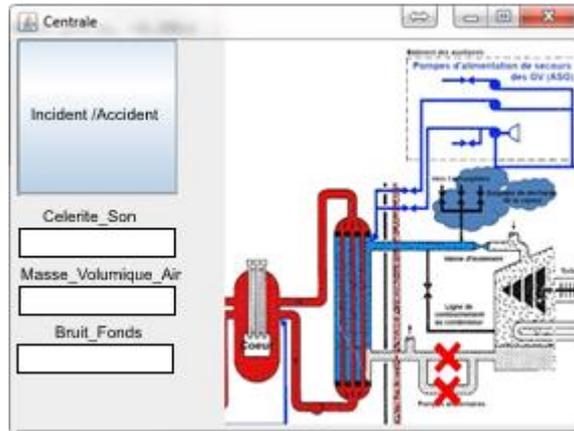


Figure 229 : Modèle de l'environnement de la plate-forme CISPI (circuit primaire) pour la validation du modèle d'interaction de détection sonore

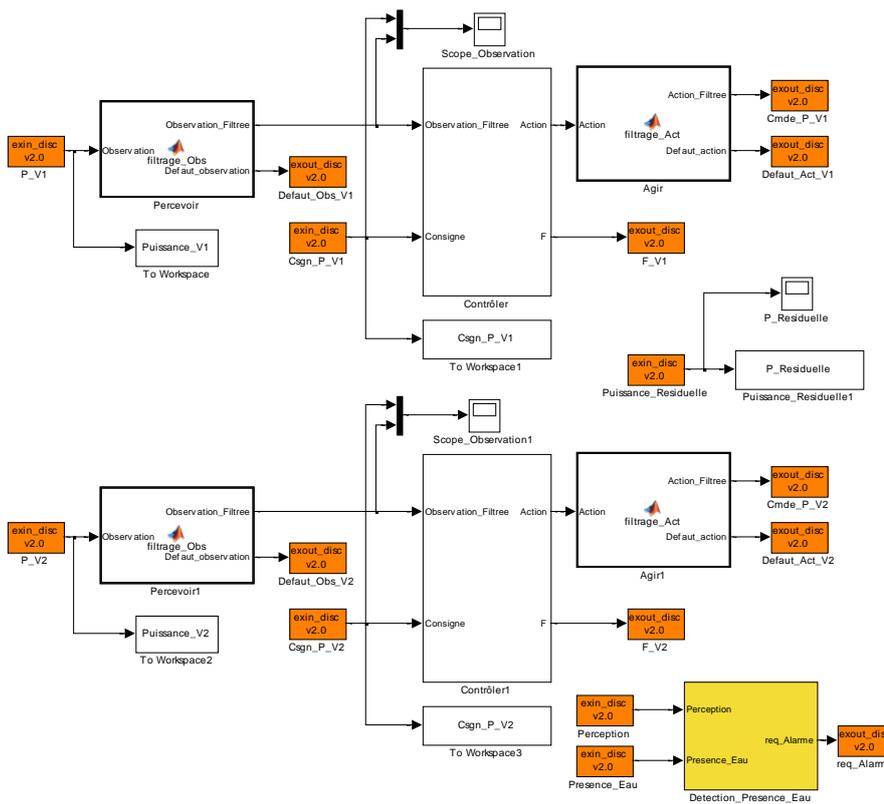


Figure 230 : Modèle de la partie contrôle du sous-système logique de la plate-forme CISPI avec des ports de type "Cosimate" pour la validation du modèle d'interaction de détection sonore

Annexes

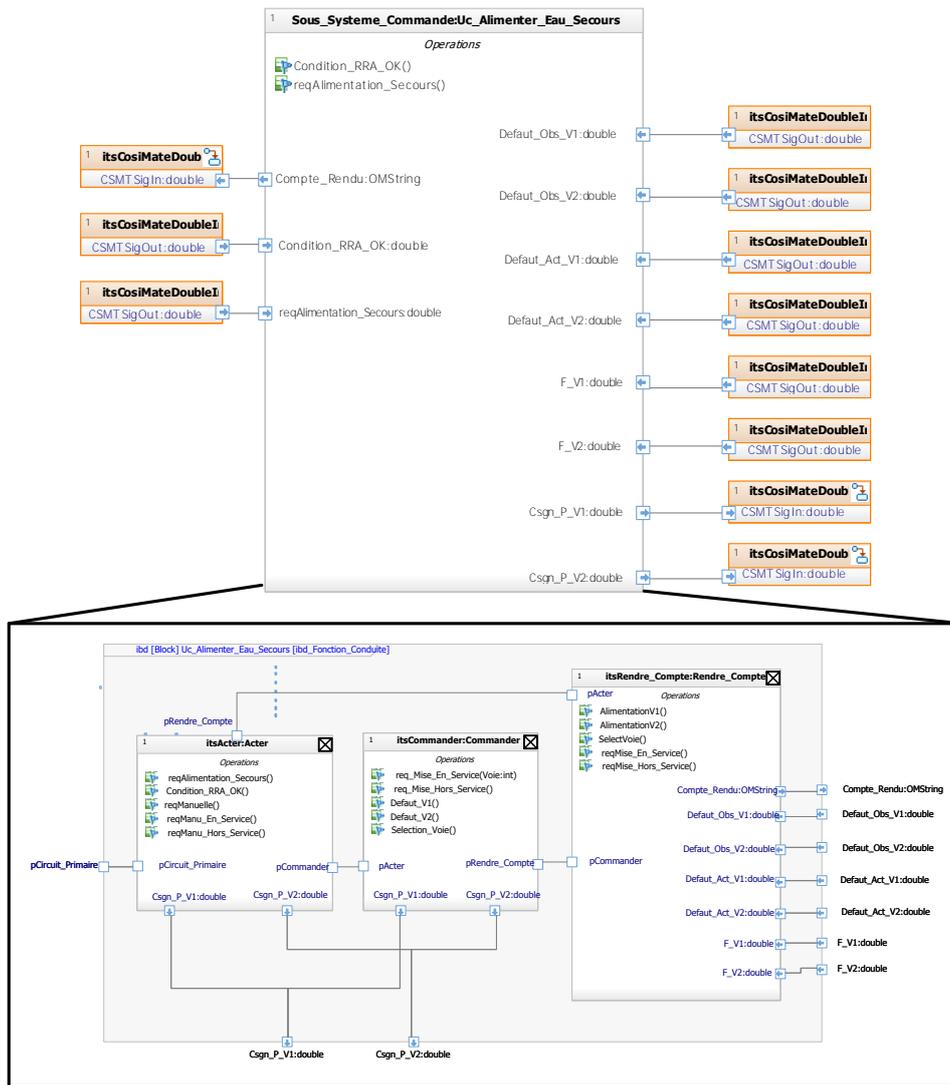


Figure 231 : Modèle de la partie commande du sous-système logique de la plate-forme CISPI avec des ports de type "Cosimate" pour la validation du modèle d'interaction de détection sonore

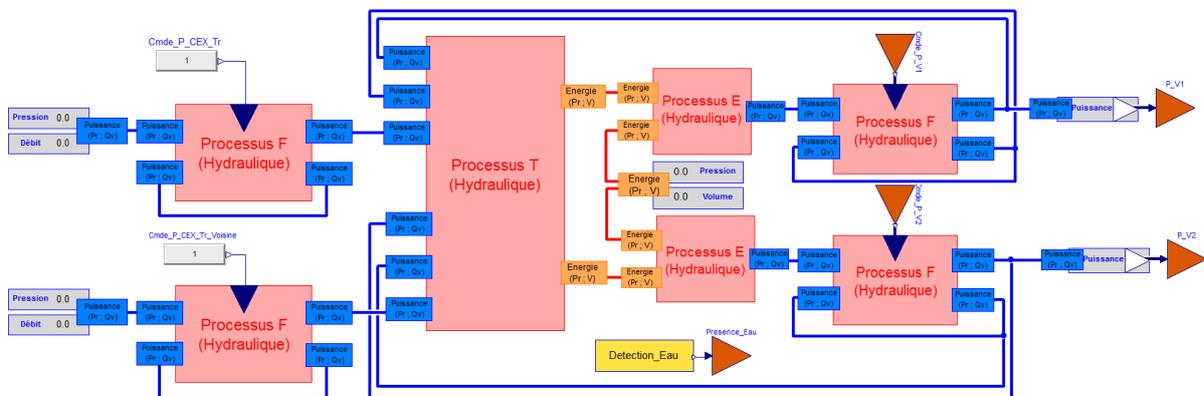


Figure 232 : Modèle du sous-système physique de la plate-forme CISPI avec des ports de type "Cosimate" pour la validation du modèle d'interaction de détection sonore

Annexes

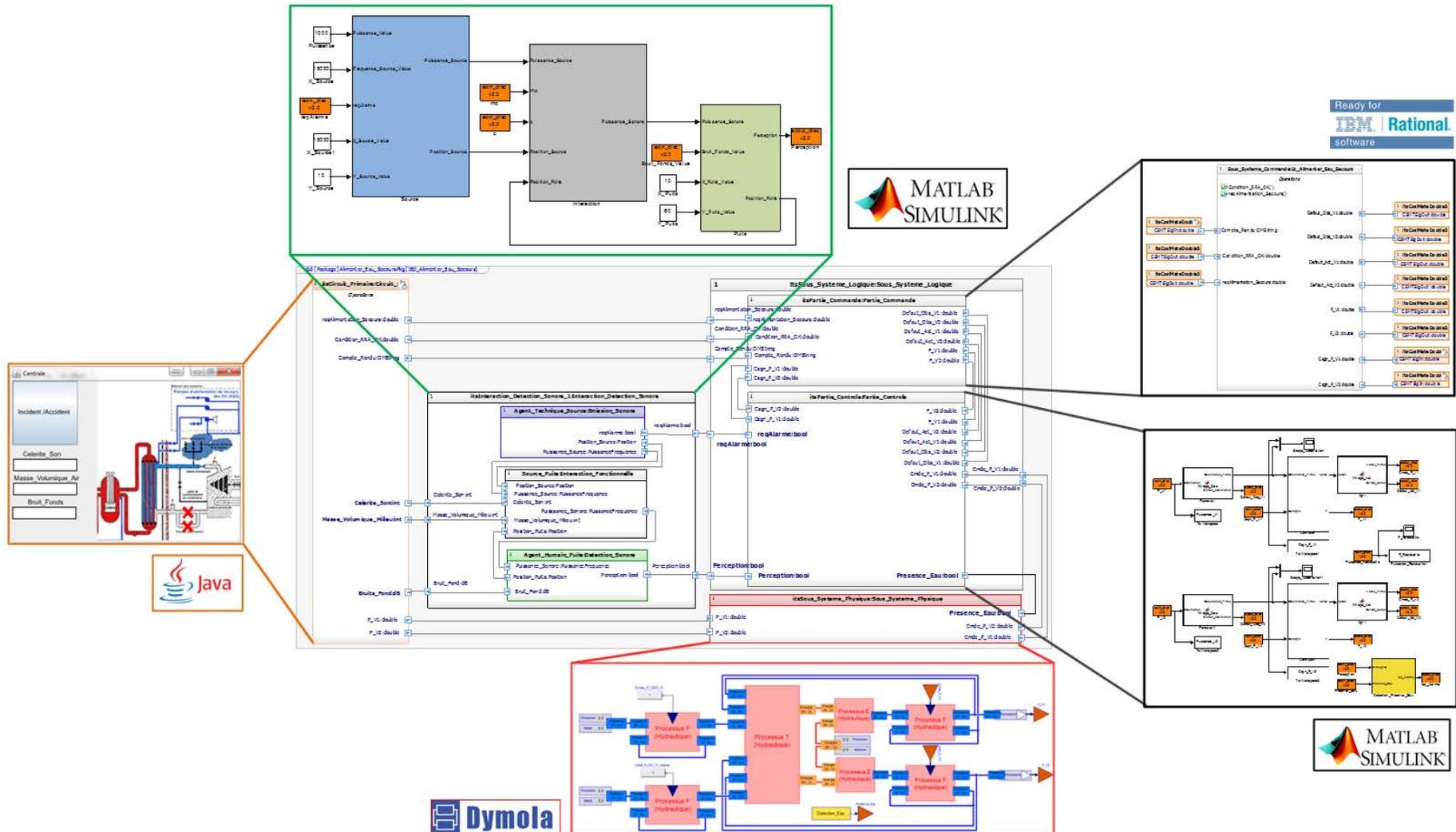


Figure 233 : Diagramme interne de blocs SysML : Architecture des modèles d'ingénierie spécialistes pour la validation du modèle d'interaction de détection sonore de la plate-forme CISPI

Résumé

Dans la mesure où un système est un ensemble d'éléments en interaction, la difficulté pour un ingénieur système est de guider l'architecture d'un modèle « total » du système en tant qu'ensemble de modèles « locaux » d'ingénieries interdisciplinaires en interaction. Les travaux présentés dans ce mémoire s'intéressent plus précisément à la nature heuristique, spécifiante et exécutable de cette relation « totale » de couplage afin de construire un modèle virtuel du système à faire. La perspective holonique retenue permet de considérer cette relation de couplage de façon descriptive du TOUT et prescriptive de chacune des PARTIES aussi bien en regard de la situation-système à percevoir que des constitutifs-système à architecturer.

Ainsi, nous avons revisité cette relation en tant que processus itératif, récursif et collaboratif de co-spécification-système visant à supporter la requête de connaissances auprès de chacune des ingénieries spécialistes délivrant en retour les modèles constitutifs satisfaisant des exigences systèmes. Notre environnement de co-modélisation-système se compose alors d'un ensemble d'environnements élémentaires de modélisation de constituants-système, avec pour objectif de préserver les outils, méthodes et processus de travail de chacune des parties prenantes. La modélisation au niveau système s'appuie sur le langage de modélisation « SysML » pour architecturer l'ensemble des connaissances. La vérification et la validation système s'effectue par co-exécution de modèles autour d'un bus de co-simulation, y compris in-situ avec la plate-forme d'expérimentation CISPI du projet SAFETECH du CRAN constituant notre cas d'application.

Abstract

Insofar as a system is a set of interacting elements, the difficulty for a system engineer is to guide the whole model architecture of a system as a set of interdisciplinary engineering part models interacting. The works presented in this thesis are specifically interested in the heuristic, specifying and executable nature of this whole relationship coupling to design a virtual model of the system-of-interest. The holonic perspectives allows us to consider this coupling relationship as descriptive of a WHOLE (**H**) and prescriptive of each parts as well in regards to system situation to perceive, as system-elements to architect.

In this sense, we revisit this relation as an iterative, recursive and collaborative process of system co-specification to the quest of knowledge with each specialist engineering delivering constitutive models satisfying basic requirements. Our system co-modelling environment is itself composed of a set of system-components modelling environment, with the stated objective to preserve tools, methods and works of each stakeholders in order to facilitate the expression of their skills. The modelling at a system level is based on the system modelling language (SysML) to architecture the set of knowledge. Verification and validation are performed by co-execution of models around a co-simulation bus, including CISPI platform of SAFETECH project of CRAN constituting our case study.