



HAL
open science

Transformation de Modèles, Approche Sémantique & Simulation – Contribution à l’Interopérabilité des Systèmes d’Entreprises

Grégory Zacharewicz

► **To cite this version:**

Grégory Zacharewicz. Transformation de Modèles, Approche Sémantique & Simulation – Contribution à l’Interopérabilité des Systèmes d’Entreprises. Modélisation et simulation. Université de Bordeaux, 2014. tel-01876599

HAL Id: tel-01876599

<https://theses.hal.science/tel-01876599>

Submitted on 18 Sep 2018

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.

N° d'ordre : XXX

HABILITATION A DIRIGER DES RECHERCHES

Présentée à

L'UNIVERSITE DE BORDEAUX

Ecole doctorale des Sciences Physiques et de l'Ingénieur

Par

Grégory Zacharewicz

Maître de Conférences à l'Université de Bordeaux – IUT Département Mesures Physiques
Laboratoire IMS UMR CNRS 5218, France

Transformation de Modèles, Approche Sémantique & Simulation – Contribution à l'Interopérabilité des Systèmes d'Entreprises

A Soutenir le 09 décembre 2014 devant le jury composé de :

| | | |
|---------------------|---|------------|
| David CHEN, | Professeur - Université de Bordeaux, Directeur des Recherches | |
| Jean-Pierre BOUREY, | Professeur - Ecole Centrale de Lille, | Rapporteur |
| Bernard ESPINASSE, | Professeur - Université Aix-Marseille, | Rapporteur |
| Tuncer ÖREN, | Professeur Emérite - Université d'Ottawa, | Rapporteur |
| Vincent CHAPURLAT, | Professeur - Ecole des Mines d'Alès, | Examineur |
| Yves DUCQ, | Professeur - Université de Bordeaux, | Examineur |
| Raul POLER, | Professeur - Universitat Politècnica de València, | Examineur |
| Bruno VALLESPÍR, | Professeur - Université de Bordeaux, | Examineur |

Remerciements

Table des matières

| | |
|---|----|
| Curriculum Vitae | 9 |
| Introduction | 11 |
| 1 Contexte..... | 12 |
| 2 Vue d'ensemble des contributions..... | 15 |
| 3 Time line..... | 19 |
| 4 Bilan des travaux de recherche..... | 21 |
| 4.1 Introduction | 21 |
| 4.2 Etat de l'art de l'Interopérabilité d'Entreprise | 21 |
| 4.2.1 Introduction | 21 |
| 4.2.2 Problématique..... | 22 |
| 4.2.3 Présentation des Concepts et Techniques d'Interopérabilité..... | 22 |
| 4.2.4 Proposition d'une plateforme pour l'interopérabilité fédérée | 34 |
| 4.2.5 Bilan des Plateformes d'Interopérabilité | 36 |
| 4.2.6 Conclusion..... | 38 |
| 4.3 Méthodologie Dirigée par M&S pour l'Interopérabilité d'Entreprise | 39 |
| 4.3.1 Introduction | 39 |
| 4.3.2 Méthodologie Dirigée par les Modèles « d'une idée vers un exécutable ».... | 40 |
| 4.3.3 Contribution de la thèse de Zhiying Tu | 45 |
| 4.3.4 Conclusion..... | 48 |
| 4.3.5 Résultats..... | 48 |
| 4.4 Contribution à l'Interopérabilité des Entreprises par Alignement d'Ontologies | 49 |
| 4.4.1 Introduction | 49 |
| 4.4.2 Contribution de la Thèse de Fuqi Song | 50 |
| 4.4.3 Alignement d'Ontologies | 50 |
| 4.4.4 Analytic Hierarchy Process (AHP)..... | 51 |
| 4.4.5 Alignement basé sur des Stratégies Multiples | 52 |
| 4.4.6 Agrégation Dynamique avec AHP | 54 |
| 4.4.7 Evaluation..... | 57 |
| 4.4.8 Conclusion..... | 59 |
| 4.4.9 Résultats..... | 59 |
| 4.5 Simulation de Workflow de Processus..... | 60 |
| 4.5.1 Introduction | 60 |
| 4.5.2 Contexte Projet PRODIGE..... | 60 |
| 4.5.3 Scénarios..... | 61 |

| | | |
|--------|---|-----|
| 4.5.4 | Système PRODIGE | 62 |
| 4.5.5 | Technologies de Développement..... | 68 |
| 4.5.6 | Premiers résultats de Simulation | 69 |
| 4.5.7 | Contribution de Judicaël Ribault pour un Workflow d’Orchestration | 69 |
| 4.5.8 | Démonstration | 76 |
| 4.5.9 | Conclusion | 78 |
| 4.5.10 | Résultats..... | 78 |
| 4.6 | Méthodologie de Transformation de EA* vers BPMN puis DEVS..... | 79 |
| 4.6.1 | Introduction | 79 |
| 4.6.2 | Etat de l’art en Modélisation de Service..... | 80 |
| 4.6.3 | Architecture MDSEA : Approches Orientées Service et Interopérabilité..... | 82 |
| 4.6.4 | Langages de Modélisation Proposés..... | 85 |
| 4.6.5 | Énoncé du Problème sur les Modèles et leur Transformation en MDSEA | 86 |
| 4.6.6 | Transformation EA* vers BPMN | 87 |
| 4.6.7 | Transformation de BPMN vers DEVS | 98 |
| 4.6.8 | Conclusion..... | 108 |
| 4.6.9 | Résultats..... | 108 |
| 4.7 | Conclusion des Travaux Réalisés..... | 109 |
| 5 | Travaux en Cours, Initiés et Perspectives..... | 111 |
| 5.1 | Introduction | 111 |
| 5.2 | Transformation de modèles pour la simulation..... | 112 |
| 5.2.1 | Introduction | 112 |
| 5.2.2 | Propositions | 112 |
| 5.2.3 | Conclusion..... | 114 |
| 5.3 | Approche Sémantique pour la réconciliation des systèmes | 115 |
| 5.3.1 | Introduction | 115 |
| 5.3.2 | MDA et Simulation | 116 |
| 5.3.3 | Adapter la Modélisation de Simulation à MDA..... | 117 |
| 5.3.4 | Démonstration | 120 |
| 5.3.5 | Discussion..... | 125 |
| 5.3.6 | Conclusion et Travaux Futurs..... | 125 |
| 5.4 | M&S de réseaux sociaux..... | 126 |
| 5.4.1 | Introduction | 126 |
| 5.4.2 | Rappel Cell-DEVS | 127 |
| 5.4.3 | Modélisation du Comportement Humain | 128 |

| | | |
|--------|---|-----|
| 5.4.4 | Utilisation de CELL-DEVS pour simuler la propagation d'information | 130 |
| 5.4.5 | Conclusion | 131 |
| 5.5 | Découverte de Modèles | 132 |
| 5.5.1 | Introduction | 132 |
| 5.5.2 | Génération de Modèles Comportementaux | 132 |
| 5.5.3 | Génération des « Code Block » Fédérés..... | 134 |
| 5.5.4 | Conclusion | 135 |
| 5.6 | Conclusion générale des Perspectives..... | 135 |
| 5.7 | Coopérations..... | 136 |
| 5.7.1 | Coopération avec L'Université « Old Dominion University » | 136 |
| 5.7.2 | Coopérations avec le CMRE de l'OTAN | 137 |
| 5.7.3 | Visites dans le cadre du CRCT 2015..... | 138 |
| 5.7.4 | Conclusion des Coopérations | 139 |
| 6 | Synthèse d'Activités | 141 |
| 6.1 | Synthèse d'Activités d'Enseignement..... | 141 |
| 6.1.1 | Mesures Physiques | 142 |
| 6.1.2 | Enseignements en Master et Ecoles d'ingénieurs..... | 144 |
| 6.2 | Synthèse d'Activités et Résultats de Recherche | 145 |
| 6.2.1 | Activités Significatives dans le Contexte National et International | 145 |
| 6.2.2 | Encadrement de Post Doc | 145 |
| 6.2.3 | Co-Encadrements de Thèses..... | 145 |
| 6.2.4 | Encadrements de Stages de Master Recherche..... | 145 |
| 6.2.5 | Participation et Leadership de Projets | 146 |
| 6.2.6 | Autres participations à des projets..... | 146 |
| 6.2.7 | Mobilités et Echanges Universitaires | 147 |
| 6.2.8 | Membres de Comités Internationaux..... | 147 |
| 6.2.9 | Participation Jurys de Thèses | 147 |
| 6.2.10 | Partenariats dans la communauté scientifique | 148 |
| 7 | Publications | 149 |
| 7.1 | Articles | 149 |
| 7.2 | Thèse | 150 |
| 7.3 | Chapitres d'ouvrage | 150 |
| 7.4 | Conférences Invitées | 150 |
| 7.5 | Sélection de 20 articles de Conférences avec Proceedings | 150 |
| 8 | Bibliographie | 152 |

Curriculum Vitae

CV Gregory Zacharewicz

37 ans. Né à Alès (Gard, France), PACSé, un enfant
Nationalité : française



Fonction actuelle:

Maître de Conférences Université Bordeaux 1 (Septembre 2007)
Activités d'enseignement à l'IUT Bordeaux 1 Département Mesures Physiques
Activités de recherche Laboratoire IMS UMR 5218 / Groupe Productique

Coordonnées

Laboratoire IMS UMR CNRS 5218 Groupe Productique (GRAI)
351 cours de la Libération, 33405 Talence cedex, France
Tel Lab: +- Tel IUT : +
Cel : +
<http://extranet.ims-bordeaux.fr/IMS/pagesPerso/accueilPagesperso.php?email=gregory.zacharewicz>

Formation

Doctorat de l'Université Paul Cézanne / Aix- Marseille III (2006)
Master « Modélisation et Conception Assisté par Ordinateur » U. Aix-Marseille (2002)
Ingénieur Ecole Polytechnique Universitaire Marseille « Génie Industriel et Informatique » (2002)

Domaines de recherche :

Modélisation et Interopérabilité d'Entreprise, Modélisation et Simulation Distribuée, Algorithmes de Synchronisation, HLA, Workflow, Modélisation DEVS, Simulation Multi-Agents, Approches Sémantiques, Ontologies, ERP, BPMN.

Activités importantes dans le contexte national et international :

Informations Générales :

- **13 articles publiés** dans des revues internationales, dont 12 indexées et à facteurs d'impacts (depuis 2006), plus de 40 articles dans des conférences internationales, et 4 chapitres d'ouvrages publiés (deux articles de revues évalués en corrections mineures et une communication en cours d'évaluation).
<http://hal.archives-ouvertes.fr/aut/zacharewicz/>
- **Prime d'Excellence Scientifique (PES)**, obtenue en 2011, durée de 4 ans.
- **CRCT (Niveau National) 2015** (1 semestre), visite d'ODU et du CMRE
- **Best Paper Award** : I3M 2009, IESA 2010; Selection Article Journal I3M 2013
- **Chercheur Invité** Old Dominion University Avril-Mai 2015
- **Chercheur Invité** Université Laval Février 2009 Financement **PEES**

Encadrements :

- **2 Thèses Co-encadrées soutenues** avec 4 articles de journaux publiés,
- **4 Thèses en cours de Co-encadrements,**
- **6 Master encadrés.**

Projets :

- **Responsable Scientifique IMS projet FUI SIMID, IMS : 126 486 € (2011-2013)**
- **Responsable Scientifique IMS projet RAPID DGA SICOMORES Financement IMS : 213 000 € (2013-2016)**
- **Responsable Scientifique IMS projet PSID2 (Post Doc Région Aquitaine + matériel) IMS : 52 000 € (2012)**
- **Membre Coordinateur académique du projet SEE (Coordinateur général NASA).**
- **Chercheur invité par PEES à l'Université Laval 2009, VMASC ODU 2015**
- **Participation Projets : FUI ISTA3, ANR PRODIGE, FP7 MSEE, FITMAN, SUDOE SIZING**

Comités Internationaux :

- **Président Général de la conférence ACM IEEE TMS/DEVS 2014 www.tms-devs.org, Précédemment Président du comité de Programme TMS/DEVS 2012 2013**
- **Membre du Comité ANVUR (Agenzia Nazionale di Valutazione del Sistema Universitario e della Ricerca) pour l'évaluation scientifique de projets nationaux et d'unités de recherche en Italie. (Evaluation : 7 projets depuis 2010, 9 travaux de recherche)**
- **Membre du Conseil de l'Ecole Doctorale « Dottorato di Ricerca in Ingegneria delle macchine e dei sistemi per l'energia, l'ambiente e i trasporti » de l'Université de Gênes.**
- **Tutorial Chair 2014, Publicity Chair 2015 de Springsim, <http://scs.org/springsim>**
- **Responsable Comité d'Organisation Local I3M 2014 Bordeaux**
- **Relecteur Journaux: Simulation, ISI, JVLC, SIMPAT, EJIE, IJBPSM, IJSPM.**
- **Relecteur Conférences: SIMUTOOLS, Simultech, I- ESA, INCOM, ECMS0, WinterSim, I3M, 10,11, APMS'09, DEVS'0, 11, 12.**
- **Organisateur de Sessions Spéciales : APMS'09, I3M'09, MOSIM'10, I3M'10, WinterSIM 11, 12**
- **Membre Comité d'Evaluation Poste MCF 61 Année 2013 à l'université Aix-Marseille**
- **Rapporteur Jury de Thèse Shafagh Jafer, Sept 2011, Université Carlton Ottawa, Canada, Sujet : « Parallel Simulation Techniques for Large-Scale Discrete-Event Models »**
- **Examineur Jury de Thèse :**
 - **Laura Capelli, Université de Gênes, Italie, 2011, Sujet : « I Modelli Di Realtà Virtuale Nella Conservazione Delle Fonti E Delle Tradizioni Orali »**
 - **Simonluca Poggi, Université de Gênes, Italie, 2011, Sujet : « Modelli per la Valutazione delle Performance nella Grande Distribuzione »**

Partenariats dans la Communauté Scientifique :

Université Laval (Québec) (thème commun : systèmes multi-agents), Université Paul Cézanne Marseille (Workflow, HLA, DEVS modélisation), Université de Gênes (HLA, simulation distribuée), Université La Sapienza (Rome) (ontologie, simulation distribuée), ODU (interopérabilité, transformation de modèles, sémantique pour l'Interopérabilité).

Introduction

Maître de Conférences depuis septembre 2007 au Département IUT Mesures Physiques de l'Université de Bordeaux, je suis chercheur dans l'équipe Productique (GRAI) du laboratoire CNRS UMR 5218 « Intégration du Matériaux au Système » (IMS).

Mes thèmes de recherche sont axés sur l'interopérabilité des systèmes et des simulations qui exécutent des modèles de Systèmes d'Information (SI) d'entreprises. L'objectif est de valider le comportement de ces systèmes et leurs interactions avec leur environnement avant leur mise en œuvre finale. J'ai co-encadré deux thèses de doctorat et six stages de recherches de Master soutenus ; je suis actuellement co-encadrant de quatre thèses traitant toujours de ces sujets. Nous avons produit 12 articles dans des revues indexées et plus de 40 papiers en conférences sur ce sujet depuis mon recrutement au laboratoire IMS en 2007. Je détiens depuis septembre 2011 une « Prime d'Excellence Scientifique ».

En outre, j'ai eu la responsabilité scientifique pour mon laboratoire du projet FUI SIMID (2009-2014), qui a porté sur l'interopérabilité dans le domaine aéronautique en partenariat avec les grands acteurs du secteur aéronautique. J'ai obtenu un financement Post-Doc de la région Aquitaine (2012). Enfin, je suis actuellement responsable scientifique du projet DGA RAPID SICOMORES (2013-2016), qui se focalise sur la transformation de modèles de réseaux sociaux pour la simulation militaire.

Je suis régulièrement impliqué dans l'organisation et la gestion scientifique de conférences de simulation. J'ai été Président Général de TMS/DEVS en 2014, après avoir été Président du Comité de programme en 2012 et 2013. J'ai été chargé d'organiser le « *Tutorial Chair* » de Springsim 2014, et l'on m'a confié la responsabilité du comité d'organisation local de la conférence I3M à Bordeaux les 10-12 Septembre 2014. Je suis « *Publicity Chair* » de Springsim 2015. J'ai coédité plusieurs actes de conférences et je fais partie de plusieurs comités de programmes. Par ailleurs, je suis membre du comité de l'école doctorale ingénierie de l'Université de Gênes et je suis appelé depuis 3 ans dans le comité italien ANVUR en tant qu'évaluateur scientifique de projets nationaux et d'unités de recherche en Italie. Enfin je suis fréquemment sollicité en tant que relecteur dans plusieurs revues (plus de détails dans le curriculum vitae).

Mon projet d'habilitation à diriger des recherches est construit en sept volets. Le premier volet décrit le contexte académique et industriel de mon domaine de recherche. Un deuxième volet présente une synthèse brève de mes activités de recherche. Il est suivi d'un volet de situation chronologique de mes travaux. Le quatrième volet présente les travaux effectués en modélisation, simulation et interopérabilité des systèmes d'entreprise en vue de dimensionner les futurs SI. Il présente les grands thèmes de recherche que j'ai pu traiter jusqu'alors. Il donne tout d'abord un état de l'art du domaine. Puis, il décrit, en détail et selon un mode chronologique, les travaux en transformation de modèles, utilisation de la simulation et approches sémantiques qui ont été réalisés en précisant l'état d'avancement. Je présente ensuite un cinquième volet donnant les perspectives à court, moyen et long terme concernant ma recherche sur l'interopérabilité des simulations. Dans le sixième volet, je présente une synthèse de mes activités d'enseignement, et administratives et de mon implication dans des actions de recherche au sein de la communauté internationale. Enfin je propose dans un dernier volet un recueil des références des publications effectuées jusqu'alors.¹

¹ Dans ce manuscrit, les référence bibliographiques sont notées (-), les articles auxquels j'ai contribué [RX], les chapitres [OX], conférences [CX], les conférences invitées [IX], les masters [MX] et les thèses [TX]

1 Contexte

Mon travail de recherche se concentre depuis 2002 sur la résolution de problèmes d'interopérabilité dans le domaine de la simulation et plus largement, depuis mon intégration à l'IMS en 2007, pour les SI d'Entreprise. Ce thème de recherche a été identifié comme prioritaire depuis le début des années 2000 dans les communautés de recherche « Système d'Information » (SI) et « Productique ». En particulier un rapport prospectif du comité d'expert du CNRS en 2007, repris par le GDR MACS (Grabot & Collectif, 2012), relève ce besoin et propose d'investiguer les techniques de modélisation de systèmes et les approches « système de systèmes » pour résoudre les problèmes d'interopérabilité des entreprises. Cette thématique est aussi identifiée par les groupes de recherche en informatique et SI. Elle est d'ailleurs au cœur du thème 3 du groupe de travail GDR I3 qui étudie des problèmes de format et de structuration de données dans les SI des entreprises. De nombreuses approches abordent le problème de l'interopérabilité des systèmes et de leurs données en se focalisant principalement sur une compatibilité statique. Peu de recherches considèrent l'aspect dynamique et temporel (i.e. l'identification d'une bonne séquence de messages, et pour cela, le besoin de synchronisation et d'orchestration des informations). En d'autres termes, une question subsistante est : Est-ce qu'une donnée est reçue juste-à-temps, c'est à dire ni trop tard ni trop tôt pour être intégrée au comportement local du SI ? La simulation distribuée a commencé à partir de la fin des années 70 à proposer des solutions de synchronisation de données, mais ces approches n'ont été que peu réembarquées dans les SI récents. Les SI récents, basés sur les services web ou les approches orientées « *Cloud Computing* » (FINES, 2012), s'intéressent davantage à la compatibilité des structures des données. Un autre frein pour comprendre et spécifier l'interopérabilité de tels systèmes réside dans la coexistence de plusieurs paradigmes et modèles de niveaux d'abstraction différents, tous utilisés pour décrire les mêmes SI. Il reste donc primordial que le sens des données et modèles soit compris par tous et mis en cohérence à tous les niveaux d'abstraction. Comment justifier leurs choix et passer d'un modèle à l'autre puis vers la simulation pour la validation dans le temps ? Ces besoins me fournissent un champ d'étude pour la mise en cohérence de l'échange dynamique d'informations.

Ma recherche a tout d'abord porté (à partir de 2002 dans ma thèse de doctorat [T0]) sur la définition d'algorithmes de synchronisation pour la Modélisation et Simulation (M&S) distribuée de composants hétérogènes en particulier des modèles à événements discrets *Discrete Event Specification* (DEVS) (Zeigler, et al., 2000). A ce moment, j'ai commencé à utiliser le standard « *High Level Architecture* » (HLA) publié aux Etats-Unis (IEEE, 2000). Cette norme provenant à l'origine du département défense (DoD) de l'armée américaine a été rapidement adoptée par des chercheurs académiques et transposée au domaine civil. Cette norme a été mise en place pour résoudre des problèmes de synchronisation et d'interopérabilité des simulations distribuées. J'ai pu proposer des algorithmes contribuant à éviter les blocages en simulation distribuée et améliorant le temps d'exécution de ces dernières grâce à une connaissance du comportement local [R10] [R11] [R12]. La deuxième caractéristique de ces composants de simulation est d'assurer l'interopérabilité avec d'autres systèmes hétérogènes pour une approche système de systèmes (*System of Systems*, SoS).

A mon arrivée à l'Université de Bordeaux et au laboratoire IMS en 2007, le groupe de recherche Productique participait à la dernière phase du Réseau Européen d'Excellence (INTEROP-NOE, 2006) visant à résoudre les problèmes d'interopérabilité rencontrés par les entreprises. En lien direct avec le résultat du projet « Interopérabilité Fédérée », j'ai pu proposer d'intégrer le standard HLA et la méthodologie d'ingénierie « *Model Driven Interoperability* » (MDI), pour l'interopérabilité des modèles. Le but étant de tester par

simulation les modèles du SI (ou d'une sous partie) en simulant leurs comportements dans son environnement avant la mise en œuvre réelle. Nous avons publié en 2008 un chapitre d'ouvrage de positionnement décrivant ce cadre original visant à composer FEDEP de HLA et MDI [R9] [R10] qui est l'épine dorsale de mes travaux.

Au-delà de l'accompagnement et de la vérification du comportement des modèles, de nombreux rapports dans le domaine des SI (ENSEMBLE, 2008) font état de la nécessité de reconsidérer les systèmes obsolètes dans la (re)conception et le développement des futurs SI d'entreprises. Ceci dans un objectif de fiabilité, de continuité et de rapidité de mise en œuvre. Ces systèmes existants peuvent être redéveloppés ou tout au moins embarqués et/ou connectés avec les nouveaux systèmes. Il est donc nécessaire de redécouvrir les spécifications souvent manquantes des systèmes dépréciés. Une idée consiste à développer un mécanisme automatisé (autant que possible), assistant l'utilisateur, pour découvrir les modèles conceptuels du système obsolète. Plusieurs travaux concourent pour (ré)explicitier sous la forme d'un modèle les systèmes existants. Ensuite, les formalismes graphiques actuels sont plébiscités dans le milieu industriel pour leur simplicité de représentation des processus tels que *Business Process Model and Notation* (BPMN) (OMG, 2011) et permettent ainsi de faciliter la compréhension des modèles par les différents acteurs au sein de l'entreprise. Ensuite le recours à un formalisme exécutable, type événements discrets, pourra permettre de jouer des scénarios de validation. Enfin il apparaît de plus en plus important d'intégrer le comportement humain et matériel (FUTURPROD, 2013) pour évaluer plus efficacement le comportement global d'une plateforme.

Les Roadmaps (FINES, 2012) et (ENSEMBLE, 2008) ont identifié le besoin de SI autonomes, évolutifs, apprenants. Une autre facette du défi actuel est donc liée à l'aspect sémantique des informations. Les SI doivent être de plus en plus agiles, notamment dans une approche système de systèmes. La sémantique est un vecteur prometteur pour faciliter la mise en correspondance de concepts et de modèles hétérogènes définissant ces systèmes. La signification des concepts permettra de mettre en correspondance des informations qui peuvent paraître d'un premier abord hétérogènes. Dans le cadre de l'Interop-NOE, des règles de compatibilités basées sur le sens ont été posées. Les premiers résultats ont permis de définir un cadre d'interopérabilité et une dimension dédiée à l'approche sémantique. A présent, le groupe Productique à l'IMS est un participant très actif de l'Interop V-Lab (INTEROP V-Lab, 2012) (successeur de NoE), qui vise à entretenir et faciliter la collaboration des chercheurs sur ce sujet. C'est dans ce contexte, au sein du V-Lab, que nous avons choisi de contribuer à l'approche d'alignement d'ontologies pour réconcilier des concepts et messages hétérogènes dans les systèmes faisant intervenir des composants distribués.

Pour résumer, l'ensemble des rapports prospectifs des futurs SI pour les entreprises convergent vers la nécessité d'être plus que jamais interactif avec son environnement ; cependant ce besoin n'est pas suffisamment appréhendé au moment de la conception du SI. Aujourd'hui la simulation permet de tester tout ou partie d'un système dans son environnement avant sa mise en œuvre définitive. La transformation de modèles, l'interopérabilité et l'enrichissement sémantique peuvent permettre de concilier des composants hétérogènes dans un contexte massivement distribué et orienté web. En complément, les objets physiques connectés par l'approche des services web pourront être couplés à ces solutions par interopérabilité et synchronisation. Nous sommes convaincus de l'utilité de ces techniques pour valider le comportement du SI de l'entreprise, ceci afin d'anticiper et de réduire les coûts éventuels dus au redéveloppement d'un système incorrect. Ces points rejoignent clairement les attentes générales de performance et fiabilité des SI énoncées dans l'appel Horizon 2020 (H2020, 2014) de la Commission Européenne.

2 Vue d'ensemble des contributions

Nous avons constaté que les décideurs d'entreprises utilisent des modèles conceptuels (modèles graphiques et/ou semi-formels) pour décrire leur SI existant et celui désiré. Ces modèles ne sont pas prêts pour être implémentés ; ces spécifications contiennent des ambiguïtés et des incompatibilités qui ne permettent pas d'être exécutables.

Le but de mes travaux de recherche est de proposer une méthode de transformation et de validation du comportement des modèles d'entreprises basée sur les meilleures pratiques en Interopérabilité d'Entreprise et en simulation (état de l'art présenté section 4.2). Cette méthode repose sur la fusion et un consensus des méthodes de développement : MDA (OMG, 2003) et HLA FEDEP (IEEE, 2003). Ceci afin de transformer des modèles récupérés de systèmes existants ou élaborés par les responsables stratégiques de l'entreprise sans considération technique. Ces modèles hétérogènes devront être transformés vers le niveau opérationnel en conservant les propriétés d'interopérabilité souhaitées par l'entreprise. L'approche fait également face à l'hétérogénéité des structures de données et des contenus. Il faudra raccorder différents composants indépendants : simulations, logiciels et données d'E/S réelles provenant de capteurs ou d'interactions humaines. Nous présentons dans la Figure 1 une vue schématique situant nos différents travaux convergents autour de cette méthode.

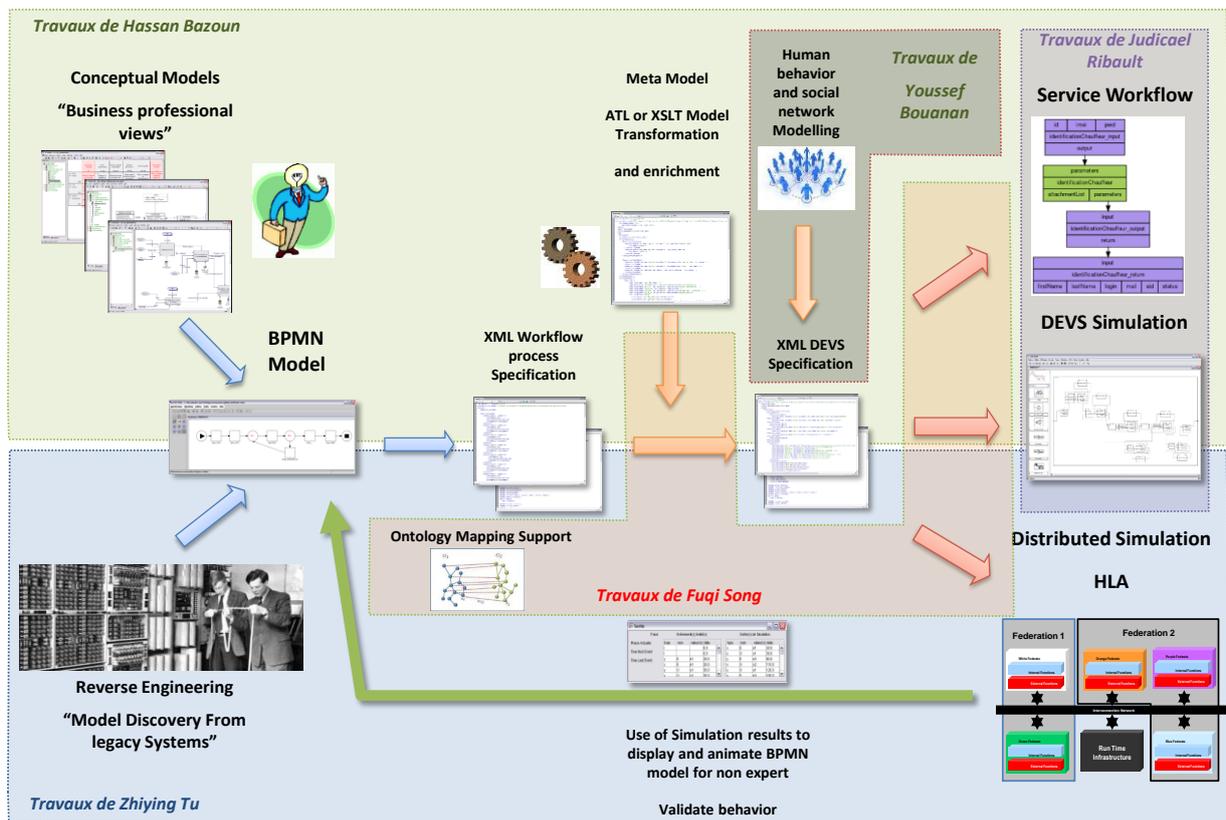


Figure 1. Model Driven Methodology pour la Simulation

Mon premier objectif est de proposer une méthodologie pour soutenir la transformation de modèles en rationalisant les modèles conceptuels vers des modèles exécutables afin de permettre, dans un premier temps, une évaluation de leur comportement, avant leur implémentation finale. Les nouveaux SI sont aussi amenés à intégrer des systèmes réutilisés. La thèse de Zhiying Tu [T1] a participé à intégrer la réingénierie par la découverte de modèles dans notre méthode de transformation (section 4.3). Nous avons proposé de découvrir des modèles depuis les systèmes obsolètes. Nous avons implémenté une plateforme de simulation

distribuée, connectée avec des services web et orchestrée par un moteur RTI HLA (partie Bleue Figure 1). Nous travaillons, dans la thèse d'Hassan Bazoun, vers un objectif consistant à proposer une méthodologie de transformation de modèles du formalisme *Extended Actigram* (EA*) vers BPMN puis vers DEVS (partie Verte Figure 1). La méthodologie s'inscrit aussi dans le cadre de référence MDSEA (MSEE, 2012). Nous avons instrumenté au niveau technique l'approche avec le recours à XML, ATL pour le mécanisme de transformation. Nous avons implémenté cela dans un outil logiciel open source. Nous avons étendu avec Fuqi Song [T2] la plateforme vers l'usage de « *matching* » d'ontologies pour permettre l'interopérabilité sémantique de la plateforme avec son environnement (partie Orange Figure 1). Avec les travaux de Judicaël Ribaut, nous avons proposé un couplage : Simulation et Service web (partie Violettes Figure 1). Pour finir nous ouvrons actuellement avec Youssef Bouanan [T4] (partie Vert foncée Figure 1) une perspective par la M&S du comportement humain qui permettra de fermer la boucle de simulation des systèmes avec le facteur humain.

Mon second objectif est une plateforme pour la fusion et l'orchestration des composants hétérogènes présentée Figure 2. Nous avons travaillé avec Judicaël Ribault [P1] au couplage d'un Workflow avec nos outils de simulation (section 4.5) [R1], par appel de service des composants de simulation pour les rendre compatibles aux technologies web. Cette contribution est un premier mécanisme opérationnel de cette plateforme inspirée de l'approche Workflow. Elle comporte un moteur d'orchestration et une interface de contrôle (interface 1, 5 dans la figure 2) utilisés pour gérer l'échange d'informations entre les éléments de simulation. Les services web, les interactions humaines (éventuellement simulées [C3] [C5]), les capteurs et interfaces de base de données (interface 2, 5, 6, 7, 8 dans la Figure 2) seront connectés avec l'approche HLA décrite dans [T2], [R6]. Le scénario d'action sera décrit en BPMN puis transformé en modèles DEVS pour diriger les étapes d'exécutions selon les travaux d'Hassan Bazoun [C4] [C5] (section 4.6). Le RTI HLA sera utilisé pour synchroniser l'ensemble d'échange de messages dans la plateforme [R2]. Il est particulièrement important que les efforts soient portés sur la création de composants web conforme à la norme HLA intégrant les services (HLA 1516 Evolved 2010) (IEEE, 2010) (interface 2 et 4 de la Figure 2). Ce point demandé dans la dernière version de la norme, n'est pas encore pleinement mis en œuvre dans les logiciels existants. Cette approche de combinaison de Workflows et de composants simulés a été validée dans deux applications : logistique [R2] [R3] et transport [R1]. Enfin, ce travail ouvre également vers une collaboration avec le centre OTAN CMRE (demande de chercheur invité pour Juin 2015).

Le troisième objectif de ma recherche est d'exploiter l'approche sémantique pour faciliter la mise en correspondance (mappage) de l'information et créer des liens pour soutenir l'interopérabilité des informations d'un composant à l'autre (Figure 3 partie centrale). Nous proposons d'utiliser l'alignement d'ontologies et les *matchers* d'agrégation pour une meilleure performance et faciliter l'interopérabilité entre les SI d'entreprises hétérogènes. Nous avons défendu en ce sens une thèse de doctorat [T1] (section 4.4) sur les « *matching* » des ontologies pour cartographier et relier les concepts. L'appariement sémantique peut être extrait de l'ensemble des données aux niveaux locaux et ensuite combiné pour produire une entité globale interconnectée (connections rouges Figure 3). Ce concept peut aider les données extérieures à se réconcilier rapidement avec la structuration et le format local et ainsi être efficacement utilisé en simulation. Ce point a fait l'objet de validation technique [R4] [R5] mais n'est pas encore pleinement opérationnalisé et reste une perspective en simulation (section 5.3). Ce domaine ouvre des perspectives de collaboration. Premièrement, pour décliner l'approche dans le domaine de la défense (avec l'Université ODU à Norfolk, obtention d'un financement chercheur invité, avril 2015 et Demande Professeur invité CMRE) et également une perspective dans le domaine médical avec l'ISPED de Bordeaux.

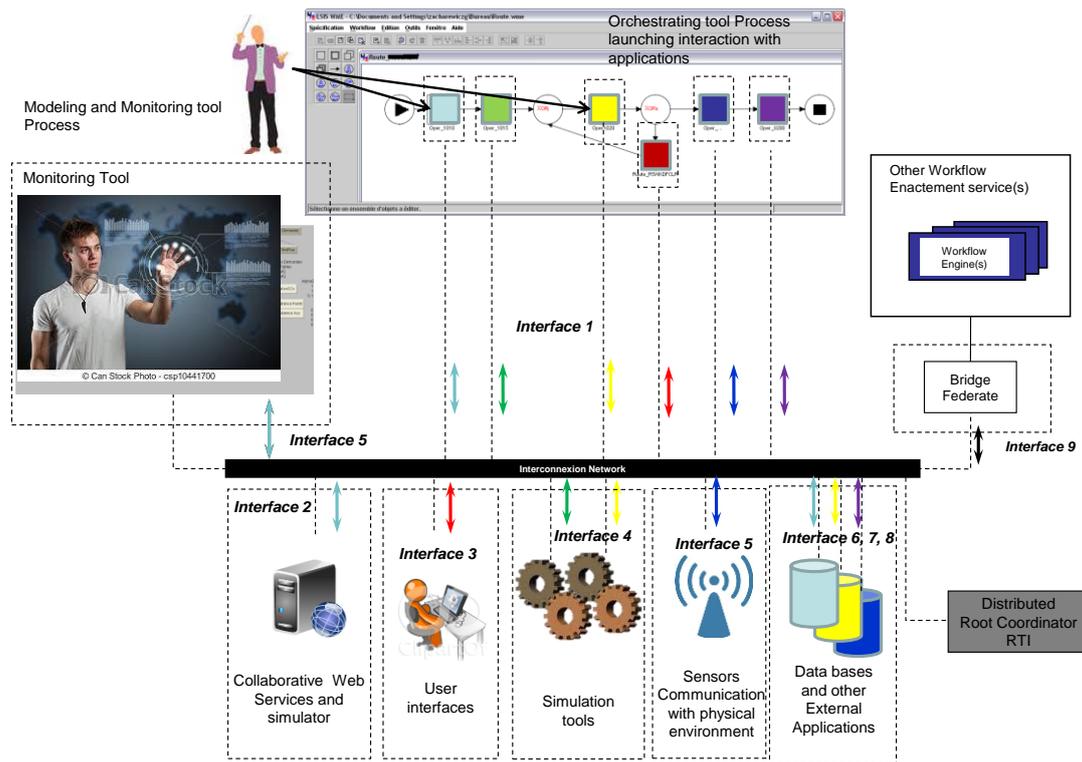


Figure 2. Cadre de M&S pour le Système d'Information d'Entreprise

Nous avons pu appliquer ces travaux dans le cadre des projets : FP7 (MSEE, 2012), ANR (PRODIGE, 2009), et FUI (SIMID, 2011) où nous avons proposé la transformation de modèles métiers vers BPMN puis vers des formalismes exécutable. Nous avons une thèse en cours dans le projet RAPID DGA SICOMORES sur la modélisation, transformation et simulation de réseaux sociaux, et nous avons dernièrement démarré deux thèses sur la transformation et l'interopérabilité dans la continuité des travaux présentés en Figure 1.

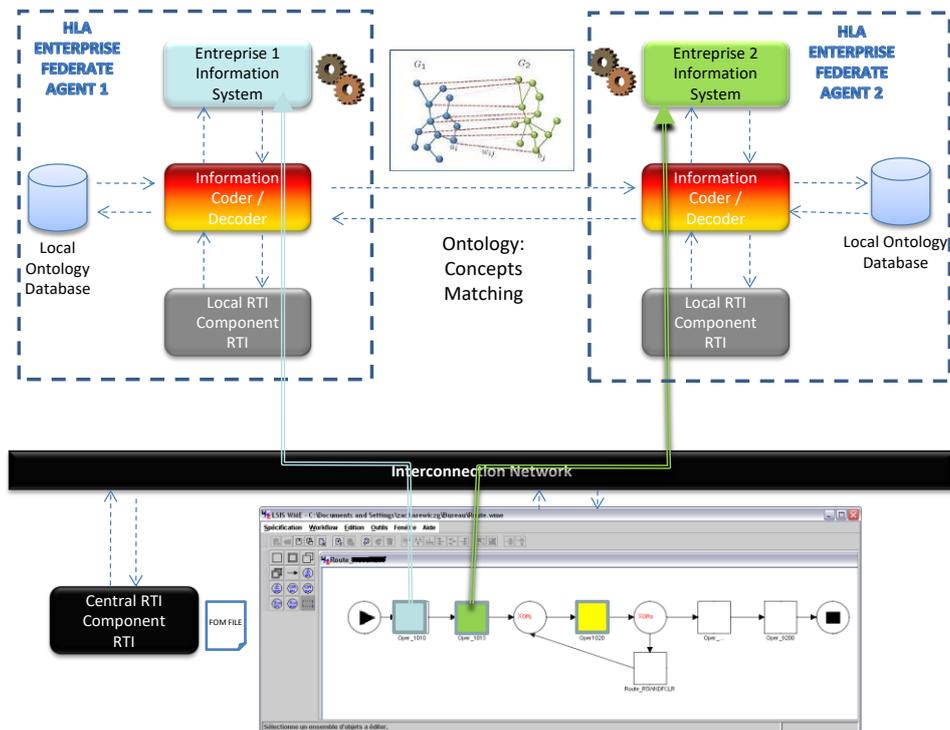
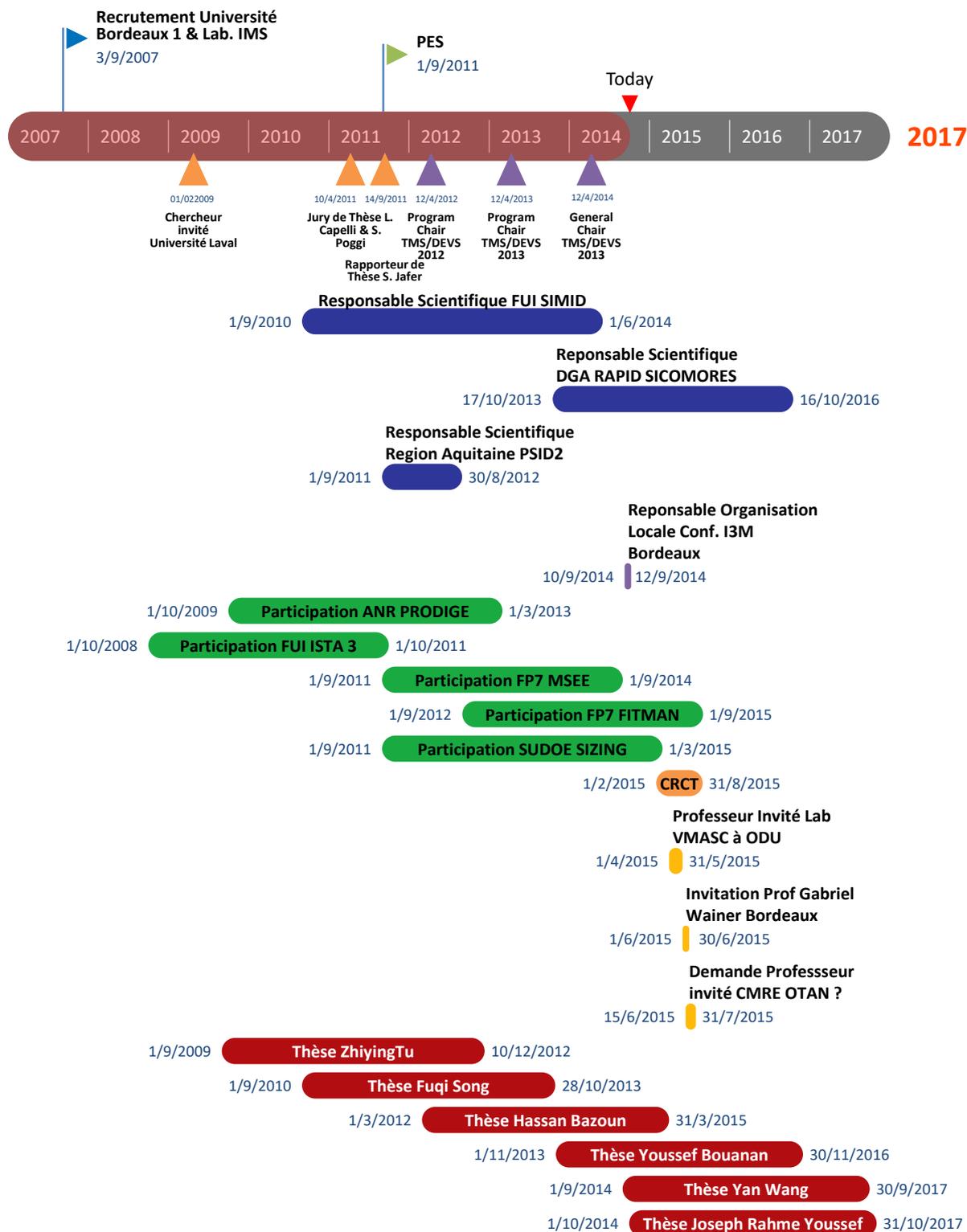


Figure 3. Utilisation d'Ontologie pour support de l'interopérabilité

3 Time line

Cette section présente chronologiquement et de façon synthétique, les évènements significatifs depuis mon recrutement à l'Université de Bordeaux et au laboratoire IMS.



Cette frise fait apparaître les responsabilités scientifiques de projets en bleu et les participations en vert. Elle présente également les encadrements de thèses en rouge. D'autres éléments marquants (Responsabilités Scientifiques ou Organisationnelles de Conférences, Chercheur Invité, Invitations, Jury de thèses, CRCT, etc.) jalonnent cette chronologie.

4 Bilan des travaux de recherche

4.1 Introduction

Dans nos travaux, nous avons retenu comme sujet d'étude les entreprises distribuées souhaitant interagir avec leur environnement en tant qu'entités distribuées et autonomes. Dans ce domaine, des travaux de spécification et de mise en œuvre sont déjà proposés et décrivent des plateformes collaboratives pour connecter les SI d'entreprises. Cependant peu d'entre eux considèrent les aspects suivants : découverte de modèles, exécution dynamique et distribuée, ainsi que traitement sémantique pour maîtriser l'échange d'informations.

Les travaux effectués s'articulent autour de la transformation de modèles, l'interopérabilité par mappage sémantique des systèmes et la simulation pour la validation de comportements souhaités. Ce chapitre présente nos travaux, complémentaires autour de ces axes de recherches. Il débute par un état de l'art de l'Interopérabilité d'Entreprise (*Enterprise Interoperability* : EI). Sur cette base, les concepts d'une nouvelle plateforme sont spécifiés. Il présente ensuite, de façon chronologique, nos travaux : Une méthodologie de transformation basée sur HLA et les services web, une méthode sémantique pour le rapprochement de concepts et modèles, une mise en œuvre d'un Workflow de services web dans le domaine des transports. Nous finissons par la réalisation d'une transformation entre EA*, BPMN et DEVS.

4.2 Etat de l'art de l'Interopérabilité d'Entreprise

4.2.1 Introduction

Dans le contexte économique globalisé, la compétitivité d'une entreprise dépend non seulement de sa productivité interne et de son rendement, mais aussi de sa capacité à collaborer avec ses partenaires. Cette nécessité a conduit à l'élaboration d'un nouveau concept dénommé « Interopérabilité », qui tend à améliorer les collaborations entre les entreprises. Nul doute, dans le contexte où les compagnies sont définies par des réseaux d'entreprises partenaires de plus en plus denses et complexes, que l'Interopérabilité d'Entreprise (EI) soit considérée comme une alternative à l'intégration totale des entreprises dans un cadre de fonctionnement unique et irréversible. Depuis le début des années 2000, plusieurs projets de recherche, notamment européens, ont été lancés pour développer l'interopérabilité des entreprises : (Consortium_IDEAS, 2002), ATHENA (Berre, et al., 2007), (INTEROP V-Lab, 2012) et plus récemment (COIN, 2011). Trois principaux thèmes ou domaines de recherche qui traitent d'interopérabilité ont été identifiés : 1) la modélisation d'entreprise (ME) qui représente des entreprises potentiellement interconnectées donc ayant des exigences d'interopérabilité ; 2) les architectures et plateformes (A&P) qui définissent des solutions de mises en œuvre pour réaliser l'interopérabilité ; 3) les ontologies (ON) portent la sémantique utile à l'interopérabilité. Au niveau national, les GDR MACS et I3 (Grabot & Collectif, 2012) ont présenté des scénarios prospectifs plaçant l'interopérabilité en concept central.

Dans les sous-sections suivantes, les différentes dimensions de l'EI, données par le Réseau d'EXcellence (INTEROP-NOE, 2006) présenté dans (Chen, et al., 2007) sont rappelées. Ensuite, les concepts de simulation distribuée et la norme d'exécution/simulation distribuée *High Level Architecture* (HLA) (IEEE, 2000) sont évoqués. Des plateformes existantes sont ensuite présentées. Puis une nouvelle plateforme reposant notamment sur des ontologies éphémères est spécifiée. Enfin, les caractéristiques de cette future plateforme sont comparées aux plateformes collaboratives existantes afin de révéler les atouts et les limitations de ces plateformes au regard des concepts d'interopérabilité. L'ensemble de nos contributions de recherche convergeront vers cette future plateforme.

4.2.2 Problématique

Les SI d'entreprises échangent des informations. Une information possède une structuration et une sémantique qui nécessitent d'être maîtrisées pour pouvoir l'utiliser pleinement. Un défi scientifique pour ces travaux consiste à donner les clés pour rendre l'information intelligible par tous les SI partenaires, ou du moins ceux qui y sont autorisés.

Les entreprises échangent des informations qui augmentent en volume et dont la structure et la sémantique évoluent régulièrement. Les outils logiciels des SI doivent donc devenir agiles pour réagir à ces besoins d'interopérabilité. A partir de cette problématique industrielle, ces travaux proposent d'étudier et de solutionner trois aspects de l'interopérabilité essentiels à ces SI collaboratifs.

Le premier aspect de l'Interopérabilité d'Entreprise est la gestion de la temporalité des informations. La dynamique doit être abordée avec des techniques fiables. Le deuxième aspect concerne la caractérisation sémantique des données d'entreprises. L'interopérabilité fédérée nécessite, en effet, une nouvelle approche pour la manipulation et l'interprétation qualitative des données échangées dans un contexte très évolutif. Le dernier aspect concerne la confidentialité des données. Les entreprises doivent gérer la sécurité des données échangées entre entités. Des niveaux de droits sur les données d'entreprises doivent, en conséquence, être définis et gérés. Les ontologies informatiques et le langage des agents logiciels peuvent donner des clés aux considérations sémantiques et causales. En outre, l'expérience des SI, de la Modélisation et Simulation (M&S) et du génie logiciel définissent des règles pour synchroniser et sécuriser les données échangées.

En synthèse, une solution est proposée dans ce contexte d'entreprises fédérées. Cette proposition sera le guide des travaux présentés dans ce manuscrit avec la combinaison du dialogue d'agents logiciels distribués, employant des ontologies éphémères, et des mécanismes de simulation distribuée pour établir la communication entre les SI d'entreprises.

4.2.3 Présentation des Concepts et Techniques d'Interopérabilité

4.2.3.1 Concepts de Base de l'Interopérabilité

L'Interopérabilité d'Entreprise désigne la capacité d'interaction entre systèmes d'entreprises. L'interopérabilité est considérée comme significative si les interactions peuvent avoir lieu à plusieurs niveaux d'abstractions pour un problème donné, dans un contexte professionnel défini et avec une sémantique définie. L'objectif est de s'attaquer aux problèmes d'interopérabilité à travers l'identification des barrières (incompatibilités) qui bloquent l'interopérabilité des systèmes. Les concepts de base relatifs à l'interopérabilité des entreprises peuvent être classés selon trois grandes dimensions (Chen, et al., 2007) représentées graphiquement par la Figure 4 et décrites ci-après.

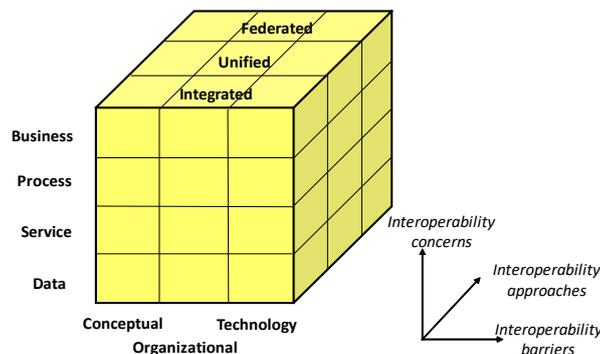


Figure 4. Cadre de l'Interopérabilité d'Entreprise

4.2.3.1.1 Dimension : Barrières d'Interopérabilité

Cette dimension considère trois barrières qui peuvent entraver l'interopérabilité (Ullberg, et al., 2009) :

- *les barrières conceptuelles* sont liées à des problèmes syntaxiques et sémantiques des informations à échanger. Cette catégorie d'obstacles concerne la modélisation à haut niveau d'abstraction, aussi bien que le niveau de codage,
- *les barrières organisationnelles* sont liées à la définition des responsabilités et de l'autorité pour que l'interopérabilité puisse avoir lieu dans de bonnes conditions,
- *les barrières technologiques* sont liées au problème de l'utilisation des technologies de l'information. Cette catégorie d'obstacles concerne les normes qui sont utilisées pour présenter, stocker, échanger, traiter et communiquer des données à travers l'utilisation de moyens informatiques.

4.2.3.1.2 Dimension : Niveaux de Préoccupation de l'Interopérabilité

Cette dimension identifie les différents niveaux décisionnels et opérationnels de l'entreprise dans laquelle l'interopérabilité doit opérer. Bien que la catégorisation suivante soit principalement issue de l'architecture ATHENA (Berre, et al., 2007) dont l'objectif est la définition d'un SI, elle peut être généralisée à des systèmes non informatiques.

– *Le niveau business* réfère à l'harmonisation au niveau décisionnel et stratégique de l'organisation du travail de l'entreprise. Cette harmonisation doit surmonter la coexistence de différents processus décisionnels, méthodes de travail, législations, cultures d'entreprise et approches commerciales, etc., coexistant au sein des filiales de la société.

– *Le niveau processus* vise à faire travailler ensemble différents processus. Un processus définit une séquence de services ou de fonctions permettant d'assurer un besoin spécifique d'une société considérée. Généralement, dans une entreprise, plusieurs processus s'exécutent en série, parallèle et en interaction. Dans le cas d'une entreprise virtuelle en réseau de sous-traitants, les processus internes des sous-sociétés doivent être connectés à leur environnement (à l'extérieur) pour créer le processus global commun.

– *Le niveau service* est préoccupé par l'identification, la composition, et le fonctionnement de différentes applications (conçues et mises en œuvre indépendamment) en résolvant les différences syntaxiques et sémantiques, ainsi que les connexions à trouver entre diverses bases de données hétérogènes. Le terme « service » n'est pas limité aux applications informatiques, mais également aux tâches non automatiques.

– *Le niveau données* se réfère à l'implémentation des différents modèles de données (hiérarchiques, relationnels, etc.) et aux différents langages de requêtes qui les manipulent. L'interopérabilité des données consiste à identifier et partager des informations provenant de bases hétérogènes, qui peuvent résider sur différents dispositifs physiques avec des systèmes d'exploitation, des langages informatiques et des systèmes de gestion de bases de données hétéroclites.

4.2.3.1.3 Dimension : Approches d'Interopérabilité

Cette dimension prend en considération les trois approches employées pour développer l'interopérabilité. Elles sont présentées ci-après chronologiquement dans l'histoire récente de l'interopérabilité.

– *Approche intégrée*. Les entreprises reconnaissent un format commun pour tous les modèles employés et les réalisations engendrées. Ce format doit être autant détaillé que les modèles. Le format commun n'est pas nécessairement une norme mais doit être accepté par toutes les parties élaborant les modèles et construisant les systèmes.

– *Approche unifiée*. Les entreprises utilisent leurs propres formalismes ou standards. Cependant, il existe un format commun aux interfaces des entreprises (seulement à un métaniveau). Ce métamodèle n'est pas une entité exécutable comme il l'est dans l'approche intégrée, mais il fournit un moyen d'équivalence sémantique pour permettre la transposition des concepts entre les modèles. Une norme de correspondance (pivot) doit être proposée. Par exemple dans le domaine de la simulation distribuée, il peut être cité CORBA, ALSP, DIS, HLA (Fujimoto, 2000). Ces normes aident les systèmes hétérogènes à communiquer sans recodage des systèmes réutilisés dans le langage de l'un d'entre eux.

– *Approche fédérée*. Les entreprises ne possèdent pas de formalisme commun. Les parties doivent s'accommoder à la volée. Cette approche « fédérée » implique qu'aucun partenaire n'impose ses modèles, langages et méthodes de travail. Les entreprises doivent pouvoir interpréter l'information reçue à partir de leurs expériences et de leurs connaissances antérieures sur les structures de représentation des données dans le(s) domaine(s) où elles travaillent. L'utilisation d'ontologies de domaine, jointes aux informations transmises ou bâties localement par expérience, peut contribuer à cette compréhension.

La plupart des approches d'interopérabilité développées actuellement sont unifiées. Par exemple dans le domaine de la Modélisation d'Entreprise, les formalismes *Pop** (Chen, et al., 2009), *Unified Enterprise Modeling Language* (UEML, 2003) et *Process Specification Language* (PSL, 2003) visent à soutenir l'interopérabilité entre modèles d'entreprises par des formalismes unifiant la représentation des concepts.

La recherche et la mise en œuvre sur le terrain de l'approche fédérée pour développer l'EI constitue la motivation de nos recherches actuelles. Ces travaux sont guidés en cela par les besoins des entreprises actuelles qui évoluent dans un contexte de plus en plus dynamique, se traduisant par des collaborations à durées déterminées. L'approche fédérée aura pour objectif de développer une interopérabilité maximale de l'entreprise avec son environnement et sera particulièrement adaptée à un cadre inter-organisationnel (entreprises en réseau, entreprises virtuelles, etc.).

D'autres travaux présentent une description de l'interopérabilité, par exemple, (Tolk & Muguira, 2003) pour la simulation. La feuille de route pour l'interopérabilité des entreprises publiée par la Commission Européenne (IST, 2006), a présenté l'approche fédérée pour l'interopérabilité (3^e génération) comme l'un des défis de recherche pour le futur. Néanmoins, nous notons que peu d'activités de recherche ont été effectuées dans cette direction.

4.2.3.2 Simulation Distribuée

Le but de la simulation distribuée est d'optimiser l'utilisation des ressources, de travailler sur des ressources distantes et/ou de réutiliser des simulations existantes, et plus généralement des systèmes, en les interconnectant. Un traitement distribué doit garantir la confidentialité, l'intégrité et les relations de causalité temporelles en utilisant des algorithmes de synchronisation.

La simulation distribuée est retenue pour assurer l'échange d'informations entre les SI car elle permet de traiter des données hétérogènes provenant de systèmes distribués également hétérogènes et ceci sans les interpréter. De plus, elle possède des mécanismes permettant l'échange de messages synchronisés. Ce n'est qu'un moyen de véhiculer et d'orchestrer l'échange des données entre SI, « alternatif » au SOA, robuste (exécuté à bas niveau, exprimé par des modèles à événements discrets, type DEVS (Zeigler, 1976)) et complètement explicite (algorithmes de synchronisation ; (Fujimoto, 2000)). L'exécution (ou la simulation) locale et l'interprétation des messages échangés restent à la charge de la définition du comportement du SI local et ne sont pas abordées dans cette étude.

4.2.3.3 Norme et Concepts HLA

L'architecture de haut niveau *High Level Architecture* (HLA) (IEEE, 2000) est une spécification qui définit une architecture logicielle pour créer une exécution logicielle globale composée de simulations et d'applications distribuées. Cette norme a été introduite pour la modélisation et la simulation du *Defense M&S Office* (DMSO) de l'*US Department of Defense* (DOD). L'objectif initial était la réutilisation et l'interopérabilité des applications militaires, des simulations et des capteurs/actionneurs en prise avec un environnement réel.

Dans la norme HLA, toute application participante est appelée *fédéré*. Les fédérés interagissent au sein d'une fédération HLA (groupe de fédérés). L'ensemble de définitions HLA a suscité la création d'une norme notée 1.3 en 1996, qui a évolué vers HLA 1516, en 2000.

La spécification des interfaces des entités HLA décrit la communication au sein de la fédération et définit la mise en œuvre d'un composant de coordination : le *Run Time Infrastructure* (RTI). Les fédérés interagissent avec les services proposés par le RTI. Ils peuvent notamment « Publier » pour informer de leur intention d'envoyer des informations à la fédération et s'« Abonner » pour tenir compte des informations créées et mises à jour par les autres fédérés. Les informations échangées dans HLA sont représentées sous la forme de classes d'objets au format XML. Les services d'échange d'informations distribuées du RTI HLA sont détaillés dans (IEEE, 2000).

Dans le contexte d'Interopérabilité d'Entreprise, HLA peut être une solution appropriée pour établir l'interopérabilité entre les SI des entreprises. HLA gère l'hétérogénéité des systèmes et met en place un « système de systèmes » au lieu d'une solution monolithique. Chaque système d'entreprise est un fédéré HLA qui est synchronisé avec les autres par le RTI HLA. La solution n'utilise en fait que la partie distribution/synchronisation de HLA et non la partie simulation comportementale. La simulation distribuée est utilisée comme une alternative aux SOA plus robustes au regard de la gestion de l'intégrité causale des messages.

4.2.3.4 Simulation Distribuée Basée Agent

Le système multi-agent (SMA) se concentre sur l'étude du comportement collectif, qui résulte de l'organisation, et des interactions d'Agents pour la résolution de problèmes. Un SMA est un système distribué dans lequel il n'existe généralement pas de contrôle centralisé ni de point de vue global. Un SMA est composé d'agents qui agissent de façon autonome, mais qui ne possèdent pas localement toutes les compétences, les ressources ou les informations requises pour assurer la cohérence globale d'une action concertée. Les agents perçoivent les modifications de leur environnement et y réagissent. Parmi les actions possibles, les agents doivent déterminer les décisions appropriées pour atteindre leurs objectifs. Le domaine d'application, l'environnement et le type d'interaction influencent la spécification de la conception des agents. De nombreuses applications basées SMA sont aujourd'hui développées. Les travaux de (Wooldridge, 2002) proposent une revue de l'utilisation d'agents en fonction de différents domaines d'application (agents cognitifs, agents logiciels, agents mobiles, etc.).

4.2.3.5 Concept d'Ontologie Ephémère

Selon (Gruber, 1993), en informatique et en sciences de l'information, une ontologie est une représentation formelle d'un ensemble de concepts d'un domaine qui de plus explicite les relations entre ces concepts. Elle est utilisée pour raisonner sur les propriétés de ce domaine, et peut être utilisée pour définir le domaine. L'ontologie de domaine est une structuration d'un aspect précis ou d'une facette du monde (un champ de travail, un métier, etc.) ou, du moins, la représentation humaine de celui-ci.

Deux classes d'ontologies peuvent être différenciées. Les ontologies techniques et les ontologies métiers. Les premières sont dédiées à la définition des éléments et des moyens mis en œuvre pour l'implémentation (bas niveau). Ces ontologies considèrent par exemple les protocoles de communication pour l'échange d'informations. La deuxième classe est assimilée à l'ontologie de domaine qui décrit les concepts et leurs relations au sein d'un métier. Les ontologies éphémères sont celles de domaine. Fondamentalement, il est possible d'ajouter une valeur sémantique sur le lien entre les concepts. Cette approche, décrite notamment dans (Gandon, et al., 2008), est basée sur le modèle entités relations des données informatiques. Le niveau de proximité est défini en ajoutant une pondération sur les liens tels que décrit par (Rada, et al., 1989) et plus récemment par (Zhong, et al., 2002). Ainsi, la collecte, l'analyse et l'interprétation d'informations peuvent être automatisées et facilitées par l'utilisation d'une approche ontologique.

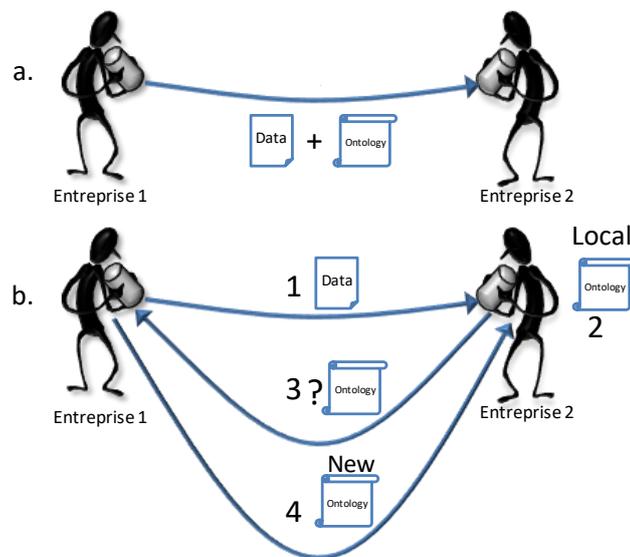


Figure 5. *Echange de Données Ephémères en Interopérabilité Fédérée*

Cependant, dans l'approche d'interopérabilité fédérée d'entreprises, aucune persistance de métamodèle commun n'est supposée exister ; le participant doit interpréter la communication à la volée. En conséquence, nous avons estimé que les structures des messages échangés et leurs ontologies doivent être de courtes durées (non persistantes) [R10]. Dans la suite, ce mécanisme de communication est illustré informellement où deux cas peuvent être distingués (Figure 5).

– *Cas a* : l'entreprise 1 envoie une information et une ontologie pour interpréter le sens de l'information (décodage) simultanément. Cette ontologie n'est supposée valable que pour cette information. L'ontologie n'est donc pas persistante dans les échanges des deux entreprises.

– *Cas b* : l'entreprise 1 envoie uniquement une information vers l'entreprise 2. Une fois que l'entreprise 2, reçoit l'information, elle interprète la signification à l'aide de sa base d'ontologies locales et détermine si elle est capable de décoder les informations. Sans quoi, elle demande à l'expéditeur l'ontologie associée au message. L'entreprise peut conserver l'ontologie reçue et la réutiliser pour d'autres données envoyées par cet émetteur ou un autre se conformant à la même ontologie. Une date de validité peut être associée à l'ontologie.

Dans la première solution, les informations peuvent être exploitées directement grâce à l'ontologie reçue simultanément. Toutefois, la taille des informations échangées est plus

importante. En outre dans cet échange systématique, l'ontologie peut être interceptée et la confidentialité peut être rompue. Dans le second cas, la confidentialité est accrue, mais davantage d'échanges entre les deux partenaires pour trouver le sens du message peuvent être requis, par conséquent la durée de la communication augmente. Les besoins de confidentialité et de performance ont conduit à focaliser l'étude sur la deuxième solution. Ce postulat a permis de créer la notion d'ontologie « courte durée » ou « éphémère ». Cette définition d'ontologie est basée sur une spécialisation de la définition de (Gruber, 1993). Il est ajouté à cette définition que l'ontologie peut être, dans certains cas, supprimée après utilisation et qu'elle possède une validité de durée finie. Cette solution respecte ainsi mieux l'exigence d'interopérabilité « à la volée » de l'approche fédérée. Ces travaux ont été publiés dans [C16], [C17], [I4], [R10] et [O2].

La question sous-jacente à l'approche fédérée en interopérabilité consiste à savoir s'il n'existe pas toujours, à un méta-niveau, une référence ou un standard pour pouvoir communiquer. La réponse est affirmative, mais cette « ontologie » persistante est pauvre sémantiquement, elle définit simplement la syntaxe des protocoles d'échange de messages ou d'information. Cette référence est une « ontologie technique » qui se situe dans les niveaux bas (service et données) de la dimension conceptuelle de l'interopérabilité. Les entreprises ne partagent donc pas les concepts au niveau business de façon permanente. Par exemple, cette ontologie permet de déterminer que l'information est une « chaîne de caractères », un « mot » (par opposition à une valeur numérique par exemple) contenant des caractères alphabétiques. Mais cette ontologie ne donne aucun sens particulier à ce mot.

4.2.3.6 Systèmes d'Informations Interopérables

4.2.3.6.1 Points d'Interopérabilité à Assurer

La première partie de la section précédente a présenté les concepts de base d'interopérabilité pour les entreprises. Puis les concepts de systèmes interopérables utilisant HLA et Agents ont été rappelés. Cette section identifie plusieurs barrières d'interopérabilité que notre étude propose de surpasser par l'implémentation d'Agents et des concepts HLA.

4.2.3.6.2 Réconciliations Syntaxiques et Sémantiques par Ontologie

Les concepts manipulés, les structures organisationnelles adoptées et les technologies employées dans une entreprise peuvent n'avoir aucune signification équivalente dans une autre. Cependant, dans le cadre d'une coopération, les entreprises ont besoin d'un rapprochement (ou d'une mise en correspondance) des concepts qu'elles manipulent respectivement, de leurs structurations organisationnelles et de leurs technologies pour interpréter correctement les informations qu'elles veulent échanger.

Les ontologies de domaine, présentées dans la section précédente, peuvent aider à réconcilier les discordances de concepts (*i.e.* des *barrières conceptuelles*) exprimées dans les différentes entreprises impliquées dans un échange d'information. Ce principe repose sur une référence sémantique à des méta-concepts communément reconnus par l'ensemble des entreprises. Cependant, dans l'approche d'interopérabilité fédérée, les mappages sémantiques des informations échangées doivent pouvoir se faire en « *peer-to-peer* » lors de l'exécution, et ce, pour une durée déterminée. Ce contexte nécessite la compréhension des concepts en temps réel. La référence sémantique commune doit donc être transmise, utilisée et admise le temps de la collaboration (éphémère), elle doit pouvoir être collectivement enrichie, mais également supprimée, par les SI fédérés. Ainsi, la référence peut être une ontologie qui est transmise (donc partagée) entre des entreprises pour une durée finie. Cette définition d'ontologie

présentée en section 3.3 a été introduite sous le terme d'« ontologie éphémère » (ou de courte durée) par [R10].

En outre, lorsque les structures organisationnelles diffèrent entre entreprises qui souhaitent coopérer (*i.e.* présence de *barrières organisationnelles*), des dysfonctionnements peuvent se produire. Par exemple, dans une relation client/fournisseur ou dans le cadre d'un projet commun, une ressource émettrice d'une entreprise peut rencontrer des problèmes pour identifier l'interlocuteur adéquat qui pourra recevoir l'information dans l'entreprise partenaire. Ces problèmes sont relatifs à la description uniquement syntaxique de la hiérarchie de l'organisation des entreprises. Les informations échangées comportent des propriétés sémantiques implicites qui peuvent permettre d'extraire des attributs. Le traitement sémantique de l'information, en utilisant une ontologie, peut faciliter, par exemple, la détermination des destinataires d'une information. Au niveau du SI les attributs révélés permettent d'identifier par leurs profils informatiques (ex. login, adresse mail, etc.) les acteurs destinataires (humains ou logiciels) capables de traiter l'information automatiquement.

Au niveau technologique, un inventaire des ontologies d'entreprise (Chen & Doumeingts, 2003) fait apparaître la prépondérance du format XML pour porter les informations entre SI fédérés (et franchir des *barrières technologiques*). Plus généralement, les principaux corpus d'ontologies sont aussi mis en œuvre en XML (RDF/S, DAML et OWL). De plus, XML permet la définition de DTD (*Data Type Definition*) ou de schéma XML dont le but est de représenter et structurer les données dans un langage balisé standardisé (supprimant des barrières technologiques liées à l'utilisation de langages hétérogènes). Les structures de données sont des grammaires qui vérifient la cohérence d'un document XML. L'ontologie peut être construite sur ces grammaires. Les considérations énoncées dans cette section restent relatives à la description statique des SI.

Par ailleurs, le processus de collaboration qui définit l'échange des informations entre entreprises doit être formalisé. Un modèle de flux de tâches (*Workflow*) permet de représenter les séquences d'échange des SI. La modélisation de *Workflow* (ou BPM) représente le processus de traitement de produits physiques ou de données. Elle décrit les séquences d'échange d'information entre partenaires et définit les rôles des acteurs des entreprises. La WfMC (*Workflow Management Coalition*) a choisi XML comme représentation de la norme Workflow (WfMC, 2005). La gestion d'un tel processus fait appel à un moteur d'orchestration dont le mécanisme est dirigé par les événements à traiter. Le format XML est également utilisé par la norme HLA qui définit les objets et l'interaction dans ce format commun. Ces données définies selon la structure classique de programmation objet permettent de faciliter la constitution et la réutilisation de bibliothèques de données partagées (persistantes ou non) entre SI hétérogènes répartis.

Enfin, la possibilité de transformer la structure des données XML par l'utilisation d'un processeur XSL (*Extensible Stylesheet Language*) apporte cohérence et robustesse. Les données peuvent être transformées verticalement pour atteindre un niveau d'abstraction souhaité et horizontalement entre formalismes différents. Ceci en définissant un mécanisme (autant que possible) automatisé de transformation et d'enrichissement (ex. par référence à une ontologie validée par des experts du domaine), tel que présenté dans le projet LSIS-WME [R12] et [R10].

4.2.3.6.3 Causalité Temporelle dans les SI d'Entreprises

L'approche fédérée pousse plus loin la notion d'EI. Au cours de l'exécution, l'entreprise a besoin d'échanger des messages à la volée, tout en conservant un comportement déterminé par les spécifications du modèle d'entreprise. Dans ce contexte, une préoccupation consiste à

surmonter des obstacles organisationnels et technologiques pour être sûr de respecter la causalité temporelle et la chaîne de causalité des actes sur l'information. En outre, dans l'approche d'interopérabilité fédérée, les droits sur l'information peuvent évoluer. Après une période de coopération dans un projet commun, ce droit peut être modifié en fonction de la nouvelle position de l'entreprise (par exemple, responsable de lot de travail dans un projet, participant à un lot, ne participant plus au projet, etc.). Ce sont clairement des barrières organisationnelles. Par ailleurs, l'identification et l'expression du problème de causalité dans le modèle de processus (barrières conceptuelles) facilitent l'implémentation (barrières technologiques).

Pour conforter ce propos, (Chen, et al., 2007) résumant les recherches actuelles et identifient de la même façon la nécessité d'une gestion de l'espace mais aussi du temps pour éliminer au mieux les barrières conceptuelles. La modélisation et l'approche simulation distribuée proposent aujourd'hui des solutions matures. En particulier, le respect de la causalité temporelle de l'information échangée est traité depuis la fin des années 1970 avec l'introduction d'algorithmes de synchronisation (Fujimoto, 2000). Plus tard, les normes (IEEE, 2000) impliquent ces algorithmes dans des applications de modélisation et simulation pour soutenir et faciliter le développement de plateformes distribuées. Par exemple, dans [R13], l'interaction entre des modèles DEVS (Zeigler, et al., 2000) distribués est détaillée. Par conséquent, l'expérience du domaine de la M&S peut servir pour la synchronisation des modèles d'entreprise. Concrètement, la simulation distribuée utilise des règles de synchronisation temporelles (*i.e.* respect de la causalité) ; celles-ci peuvent être utilisées pour régir le comportement du SI distribué.

4.2.3.6.4 Gestion du Partage des Données (Confidentialité des Informations)

Dans une relation de partenariat, de sous-traitance ou de client/fournisseur entre entreprises, il est nécessaire de définir des responsabilités parmi les ressources (humaines ou logicielles) des entreprises, et notamment le droit d'émettre, de recevoir et de traiter l'information. C'est un problème qui doit être clairement pris en compte (barrière organisationnelle). Ces propriétés et droits concédés aux ressources peuvent évoluer en cours d'exécution et doivent être intégrés dans le modèle de processus de collaboration qui définit la relation entre entreprises (barrière conceptuelle). Concernant toujours ce postulat, l'autre principal problème d'interopérabilité est la gestion de la confidentialité des données au niveau implémentation (barrière technologique).

La norme (ISO_TC184, 1999) statue sur l'obligation pour une entreprise de partager certaines données sélectionnées dans un objectif d'interopérabilité, mais prescrit de maintenir les autres informations de l'entreprise confidentielles, c'est la définition de données privées/publiques. La norme HLA, réalisée initialement dans l'objectif d'échange d'information entre simulations distribuées militaires, permet de solutionner ce problème. HLA fonde son approche sur la théorie des ensembles : elle définit des sous-ensembles de données à partager par interopérabilité et d'autres sous-ensembles qui ne doivent pas être révélés aux composants extérieurs. Plus en détail, les données de l'entreprise doivent être partitionnées en ensembles classés avec des niveaux de confidentialité. Ce champ est bien développé dans les jeux de guerre militaires interopérables (IEEE, 2000) et peut être transposé à la problématique des entreprises fédérées.

Dans le détail, HLA emploie la théorie des ensembles mathématiques pour définir des sous-ensembles de données pouvant être échangées ou rester confidentielles. En fonction de ses droits, le fédéré peut partager, mettre à jour, manipuler et recevoir des données. Ces droits peuvent être réutilisés et généralisés pour la définition des relations entre les SIs d'entreprises distribuées.

4.2.3.7 *SI Collaboratifs Interopérables*

Les besoins croissants d'interconnexion des entreprises, font naître une nouvelle catégorie de logiciels pour l'échange d'informations dans les années 1990. Les plateformes de collaboration, décrites par (Timmers, 1998), sont des plateformes logicielles d'interopérabilités unifiées qui facilitent la communication synchrone et asynchrone grâce à une variété de services et de canaux de communication.

4.2.3.7.1 *Premiers SI Collaboratifs Interopérables*

(Leigh, et al., 1997) présentent CAVERN, un système distribué pionnier pour l'échange d'informations entre partenaires distribués. Dans cette approche, les obstacles technologiques sont au centre de la considération. Cette approche se situe, dans le cadre d'interopérabilité de l'entreprise (figure 1), aux niveaux « service et données », avec une approche « intégrée et unifiée » (figure 3). Ce système vise à définir une interface permettant de connecter le système avec d'autres systèmes hétérogènes. Ce système est unifié dans le format de l'échange d'informations mais reste finalement intégré dans sa mise en œuvre. Les concepteurs définissent des profils d'accès à l'information, mais l'élaboration de services composables n'est pas proposée. En outre, il ne définit pas la séquence d'actions sur les données (le processus). Les accès à l'information peuvent être concurrents et simultanés.

(Panetto, et al., 2004) ont présenté une revue des plateformes existantes. Ils décrivent de nombreux projets de plateformes collaboratives et situent la plateforme INTEROP qu'ils proposent. Leurs travaux intègrent l'idée que le développement de la plateforme commence à partir d'un modèle conceptuel d'entreprise (au niveau des notions métiers des entreprises considérées). En conséquence, ils élargissent le champ de portée de l'étude et intègrent une vision de plus haut niveau de l'interopérabilité. Ils formalisent les concepts, aidant ainsi la compréhension des fonctions et du comportement de la plateforme.

La Figure 6 présente les approches et plateformes CAVERN et INTEROP qui sont projetées sur le cadre d'interopérabilité afin d'observer leur couverture fonctionnelle. Les deux plateformes permettent de définir un service dédié aux profils des utilisateurs et dépendant du droit d'accès aux données. Le problème technique est également bien adressé au niveau d'abstraction le plus bas (implémentation). Néanmoins, dans ces deux plateformes, les responsabilités organisationnelles ne sont abordées que sur le plan droit d'accès aux données. Il est également possible de distinguer que seule la deuxième plateforme intègre clairement l'identification et la modélisation des concepts au niveau business avant de les mettre en œuvre dans un contexte technologique particulier.

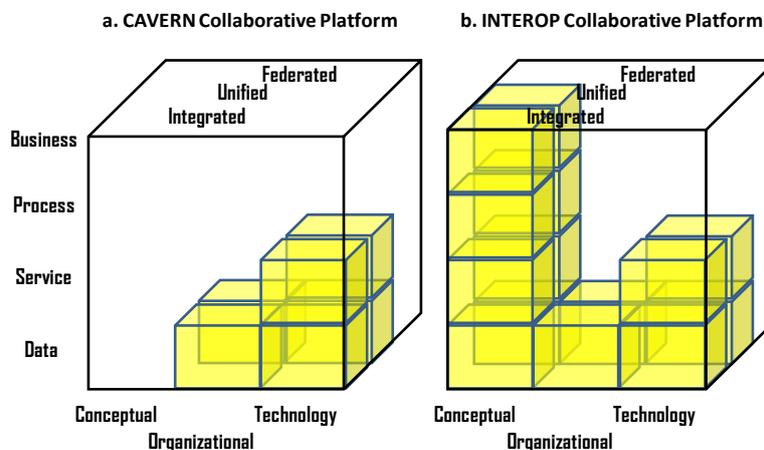


Figure 6. Couverture du Cadre d'Interopérabilité d'Entreprise (1^{ère} Génération de SI)

Depuis la fin des années 1990, il est possible d'observer que la plupart des approches développées sont passées d'une approche intégrée vers unifiée comme indiqué par la Figure 6. Pour faciliter cette approche non intégrée, l'entreprise a besoin de références, normes ou standards pour s'accorder sur l'échange d'informations. Des efforts de formalisation et de modélisation des entreprises ont été effectués dans ce sens. Par exemple dans le domaine de la modélisation d'entreprise, nous avons précédemment cité UEML, POP* et PSL (section 4.2.3.1.3) qui visent à soutenir l'interopérabilité entre les modèles d'entreprises et les outils d'implémentation.

L'étude bibliographique menée a mis en évidence, que dans les années 1990 peu d'activités de recherche ont été réalisées au sujet de l'approche fédérée pour développer l'interopérabilité des entreprises. À cette époque, cette approche n'était pas pleinement identifiée, de plus à ce moment, aucune solution logicielle et matérielle n'était suffisamment avancée pour soutenir cette approche. Aujourd'hui, l'approche fédérée, qui vise à développer une forme d'interopérabilité plus flexible (et même agile), est particulièrement attrayante pour les environnements inter-organisationnels (comme les entreprises en réseau, les entreprises virtuelles, etc.). La feuille de route sur l'interopérabilité des entreprises publiée par la Commission Européenne (IST, 2006) confirme que l'élaboration de solutions conceptuelles pour l'interopérabilité d'entreprise, et des SI et logiciels dérivés, par l'approche fédérée est considérée comme l'un des défis de recherche de ce domaine pour les années à venir.

4.2.3.7.2 Perspectives pour l'Interopérabilité depuis les Premières Solutions

L'état de l'art sur l'interopérabilité des entreprises et les deux premières expériences de mises en œuvre à la fin des années 1990, présentées figure 3, indiquent les zones d'interopérabilité qui n'ont pas été abordées par ces premières approches. De ce postulat, plusieurs directions de recherche pour renforcer l'interopérabilité par l'élimination de barrières ont été envisagées au début du 21^{ème} siècle.

La première orientation a concerné l'amélioration de la représentation des réseaux d'entreprises permettant de franchir de nouvelles barrières conceptuelles. La définition de paradigmes spécifiques pour modéliser les entreprises, type UEML, GRAI (Doumeings, 1984) (au niveau conceptuel), ainsi que les langages type UML, Workflow (WfMC, 1999), BPM (OMG, 2011) (à des niveaux d'abstraction plus proches de l'implémentation) ont pu concourir à cette amélioration. Ces formalisations ont permis de rationaliser la spécification des entreprises afin de faciliter la proposition de SI, ceci, en s'accordant sur les notions manipulées depuis les concepts jusqu'à la mise en œuvre. Les transformations de modèles sont encadrées par des méthodologies *Model Driven* (MDA) (OMG, 2003).

Malgré la formalisation du niveau conceptuel et le cadrage méthodologique du développement, il subsiste un certain nombre d'ambiguïtés ou d'imprécisions à lever pour développer un SI. En effet ce niveau de modélisation représente l'ensemble d'un système d'une entreprise. Dans l'objectif de développer un SI il reste à définir la sous-partie de ce système à informatiser. Dans ce sous-ensemble, il apparaît une deuxième exigence non adressée au niveau modélisation d'entreprise : le comportement dynamique, *i.e.* la synchronisation des informations selon des règles métiers et des responsabilités organisationnelles (des barrières organisationnelles doivent être prises en compte, pour définir les séquences d'accès aux données). Le déroulement approprié des échanges d'informations et la responsabilité des ressources nécessaires pour les traiter sont importantes, l'ignorer peut conduire à des malentendus et au mauvais fonctionnement du modèle puis du SI développé. Le domaine des SI traduit l'accès aux données et éventuellement la séquentialité des actions sur les données. Mais la relation aux traitements datés est laissée au domaine de la simulation.

La simulation distribuée, en particulier (ex. HLA), considère, de plus, la synchronisation de systèmes distribués et hétérogènes.

Enfin, le travail des entreprises en réseaux de partenaires incite à la sécurisation des données manipulées. La Modélisation d'Entreprise a dû intégrer la gestion de la confidentialité des données. En particulier, l'interopérabilité peut être considérée entre entreprises partenaires dans un projet mais concurrentes sur d'autres points. Dans ce contexte, une stratégie de partage/protection des données doit définir les responsabilités et les droits des personnes à accéder aux informations dans les différentes entreprises du réseau. La sécurisation des applications et des réseaux informatiques a permis de concourir à un contrôle détaillé des informations.

4.2.3.8 Plateformes d'Interopérabilité Mises en Œuvre en Fédérations HLA

De nombreuses plateformes d'interopérabilité sont apparues depuis les années 1990. Une plateforme d'interopérabilité est composée d'un système matériel et logiciel permettant de faire communiquer des SI, des applications et/ou des simulations, distants et hétérogènes. Dans le cadre de cette étude développée, plusieurs plateformes ont été étudiées. En particulier, il a été observé que les plateformes s'appuyant sur la norme HLA (aujourd'hui employée dans les applications industrielles civiles) résolvent en grande partie les barrières qui subsistaient dans les premières générations de SI. En conséquence, cette section se concentre sur cette catégorie de plateformes. Cette section présente plusieurs approches utilisant HLA pour soutenir la mise en œuvre d'une solution d'interopérabilité au niveau SI d'entreprise. Les trois catégories de barrières à dépasser seront observées au regard des fonctionnalités des plateformes. La Figure 7 présente un schéma pour chacune des 4 architectures étudiées.

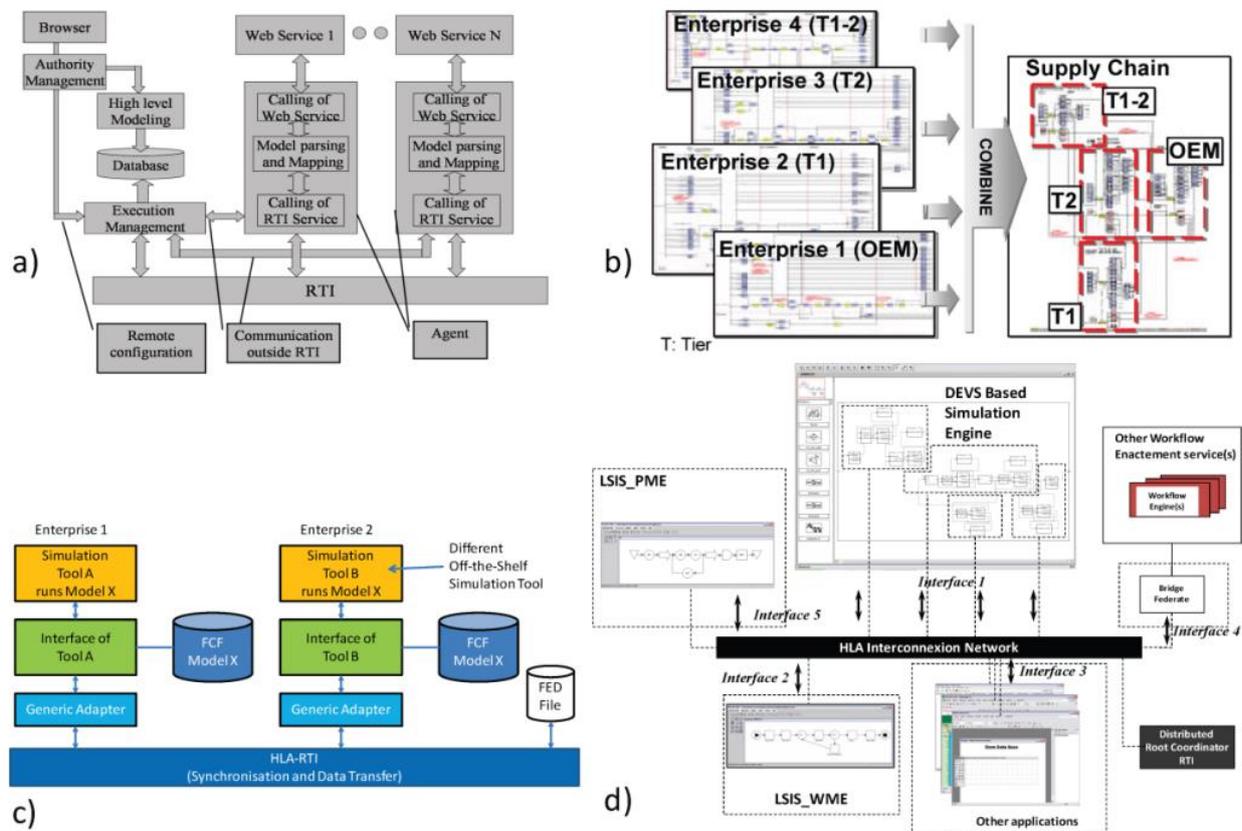


Figure 7. Plateformes d'Interopérabilité Compatibles HLA

4.2.3.8.1 *Multidisciplinary Collaborative Design of Virtual Prototyping (MCDVP)*

Le développement de produits complexes requiert une connaissance pluridisciplinaire et implique la coopération assistée par ordinateur des concepteurs. Les technologies de la collaboration multi-domaine sont des approches efficaces pour la spécification et le développement d'un produit complexe. Les auteurs (Zhang, et al., 2007) suggèrent d'appliquer les techniques de modélisation et simulation multi-domaine au niveau du développement des produits complexes (Figure 7a).

L'élément clé de cette approche consiste à intégrer différents outils logiciels autonomes dans un environnement distribué. La nature des composants de cette plateforme de modélisation et simulation pour la conception et la collaboration multi-domaine a nécessité de placer l'interopérabilité au cœur des préoccupations. Dans ce travail, les auteurs proposent une structure fondée sur HLA et les services web pour le développement de solutions d'interopérabilité grâce à une collaboration pluridisciplinaire et dans un contexte d'environnement distribué. Le processus de gestion de projet de la collaboration multi-domaine est, en particulier, intégré dans un outil de contrôle centralisé des processus distribués.

4.2.3.8.2 *Common Enterprise Modelling Framework for Distributed Organizations (CEMF-DO)*

L'objectif de CEMF-DO est de fournir, à des organisations distribuées, une structure commune dans laquelle la modélisation, la simulation, l'analyse et la gestion des modèles pour le développement de solutions d'interopérabilité sont étudiées et intégrées. La mise en œuvre se fait en implantant chaque composant distribué en tant que fédéré HLA (Figure 7b) agissant comme une ressource d'un processus considéré.

Les recherches publiées par (Berio, et al., 2005) sont liées au langage UEMML, ainsi qu'à la gestion et la synchronisation des modèles d'entreprise. Cette recherche a été réalisée pour un lot de travail dans le REX INTEROP (Chen, et al., 2007).

4.2.3.8.3 *Modelling and Simulation Environments for Design, Planning and Operation of Globally Distributed Enterprise (MISSION)*

Les travaux de (Jaekel, 2005) présentent une simulation distribuée de chaînes d'approvisionnement par une approche de type fédération HLA. Dans ce domaine, l'approche proposée par les auteurs se concentre sur la simulation distribuée du processus de distribution et en particulier la chaîne d'approvisionnement. Le concept global est basé sur les résultats du module européen MISSION (Rabe & Jaekel, 2002) et sur une extension de l'IEM (*Integrated Enterprise Modelling*). Cette approche comprend les aspects de modélisation qui décrivent comment un utilisateur peut collecter les données nécessaires pour la simulation distribuée. De plus, il décrit comment les différents modèles de simulation peuvent être choisis à partir d'une bibliothèque de modèles, puis connectés grâce à un modèle d'entreprise global. L'approche emploie HLA pour soutenir une simulation distribuée d'un système industriel. Cette démarche peut être considérée comme une spécialisation de la norme HLA pour les systèmes civils industriels.

Dans cette approche (voir Figure 7c), un outil de simulation gère la définition et l'interopérabilité des modèles de simulation par des échanges d'objets. Il propose un outil graphique intuitif pour définir des scénarios de simulation de chaînes de production. L'outil de gestion de simulation garantit la cohérence entre les fichiers de configuration de fédérations pour le scénario de simulation distribuée et génère en conséquence tous les fichiers requis par le RTI pour la simulation.

4.2.3.8.4 LSIS - Workflow Model Editor (LSIS-WME)

Dans [R12], une plateforme de M&S « ouverte » est proposée pour créer et exécuter des modèles de flux de production dans le domaine de la fabrication de l'industrie micro-électronique. HLA permet, dans cette plateforme, d'assurer l'interopérabilité de l'environnement de M&S avec d'autres composants logiciels hétérogènes de l'entreprise, notamment des applications professionnelles spécifiques. La simulation distribuée est utilisée pour simuler une nouvelle chaîne de production, afin d'anticiper de mauvais changements qui pourraient provoquer des dysfonctionnements ou des contre-performances de production.

La Figure 7d illustre l'interopérabilité, orchestrée par un HLA RTI, entre l'environnement LSIS-WME et les composants logiciels d'entreprise. Les applications communiquent par publication et abonnement à des informations gérées par le RTI. L'accès aux données est limité par les droits définis de publication/abonnement à des sous-ensembles d'informations. Cette représentation illustre également la capacité de l'environnement à se connecter à d'autres composants hétérogènes ainsi qu'à d'autres logiciels compatibles HLA.

4.2.4 Proposition d'une plateforme pour l'interopérabilité fédérée

La section précédente a présenté des plateformes collaboratives d'entreprises unifiées ou intégrées. Cette section pose les bases conceptuelles d'une plateforme pour l'approche d'interopérabilité entre entreprises fédérées, en utilisant en particulier l'ontologie. Cette plateforme représente notre horizon de recherche, elle est progressivement mise en œuvre dans nos travaux.

4.2.4.1 Définition de la plateforme

Notre proposition part des besoins d'interopérabilité énoncé en 4.2.2 pour l'interfaçage des entreprises dans le cadre de projets coopératifs. Les approches agents ou Systèmes Multi Agents (SMA) peuvent apporter une réponse efficace (Ören, 1996). Par exemple, (Labarthe, et al., 2007) ont présenté une solution établissant l'interopérabilité des entreprises à l'aide de SMA. Ils mettent en place une communication basée sur des Agents utilisant la plateforme JADE. Par ailleurs, (Zacharewicz, et al., 2008) [T0] ont défini un moteur Workflow basé DEVS (Zeigler, et al., 2000) et interopérable par HLA. La convergence de ces deux catégories d'approches pourrait présenter les bases d'une démarche pour améliorer l'interopérabilité d'entreprises. Notre étude propose donc de répondre à deux besoins des entreprises en réseau.

La première exigence pour la mise en réseau des entreprises est de résoudre la non-interopérabilité des données et des services. HLA fait partie d'une solution. Par exemple dans le cas pratique de la Figure 8, l'objectif est d'établir des liens vers un « Bus de Service d'Interopérabilité » (se référant aux concepts de l'« Enterprise Service Bus » de (Chappell, 2004), et de connecter de nouvelles fonctionnalités avec des composants déjà connectés (par exemple, DEVS/HLA AnyLogic©, HLA, etc.). La sous-section suivante détaille comment une plateforme compatible HLA peut faciliter l'intégration de tous les composants.

Le deuxième point consiste à prendre en compte l'exigence d'interopérabilité à chaque étape du processus de développement d'un SI et d'essayer de comprendre comment faciliter l'interopérabilité vers un niveau inférieur d'abstraction. Cette idée, introduite dans MDI par (Bourey, et al., 2007), consiste à définir des modèles d'interopérabilité à chaque niveau de modélisation et de les réutiliser pour faciliter l'interopérabilité inter-niveaux depuis les modèles de processus business vers les services et jusqu'à l'implémentation des données.

4.2.4.2 Plateforme d'interopérabilité de SI basée SMA compatible HLA

La nouvelle notion d'interopérabilité des entreprises, énoncée dans la section précédente, peut être implémentée au moment de l'exécution par des agents fédérés. Basée sur l'expérience de l'utilisation des SMA/HLA, une mise en œuvre innovante de l'EI en fédération est proposée (voir Figure 8).

Les SI des entreprises sont fréquemment considérés comme des boîtes noires. Ils sont couramment mis au point de façon *ad hoc* et/ou par un vendeur de solutions. Cela implique qu'aucune action sur son comportement ou modification ne peut être aisément effectuée. De ce fait, notre solution consiste plutôt à ajouter une couche d'interopérabilité entre le SI et son environnement. Précisément, l'idée est d'ajouter des composants pour coder et décoder les informations échangées entre le SI et les applications d'autres entreprises. Cette section dévoile les composants requis pour cette plateforme globale distribuée. La mise en œuvre distribuée implique l'extension de deux composants pour l'entreprise locale afin de définir un « HLA Enterprise Federated Agent » (HEFA). Les éléments de cette nouvelle architecture ont été présentés [C15] [02] ci-après en rapport avec la description de la Figure 8.

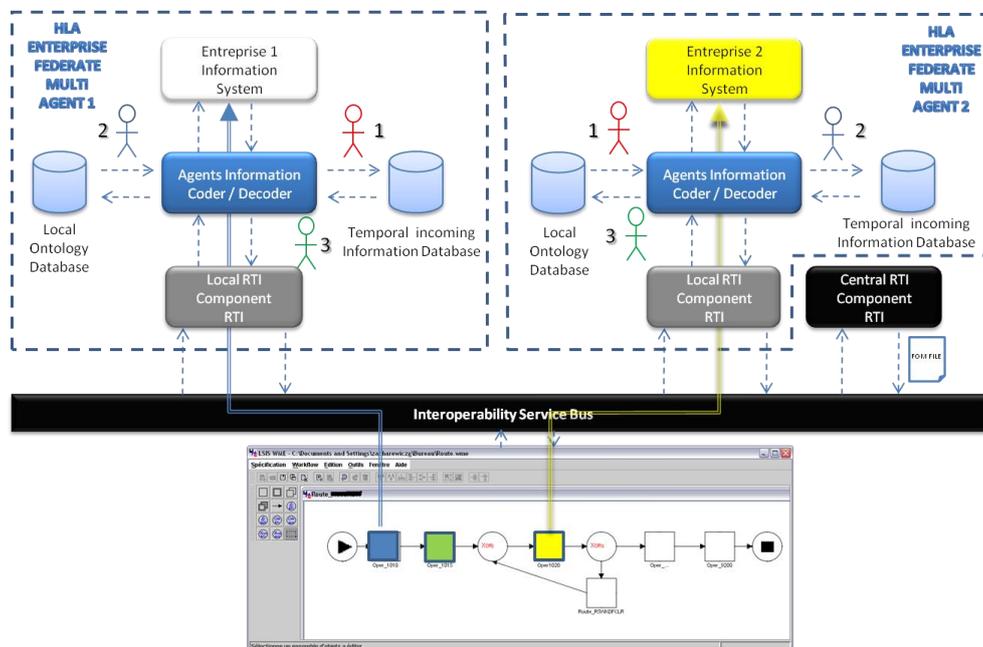


Figure 8. Plateforme d'Echange de Données par Fédération d'Agents

Dans l'architecture proposée, les services fournis par les SI locaux des entreprises restent inchangés. Des agents logiciels intermédiaires transforment l'information du format local du SI au format commun XML/HLA et *vice versa*. De plus, HLA nécessite l'ajout d'un composant « Local RTI Component » (LRC), qui interface avec les messages d'entrée et de sortie du réseau. L'approche proposée ajoute une autre couche composant « Agent Information Coder/Decoder » (AICD), qui est le centre du système Agent. Il s'agit d'un composant logiciel spécifique, nouvellement introduit dans cette approche. Il interprète les informations reçues depuis le réseau et les transforme vers un format local. Les agents utilisent une ontologie de domaine éphémère (provenant d'une base locale ou de l'extérieur) pour interpréter et transformer l'information. Les agents ont vocation à être implémentés en JAVA sur une plateforme de simulation. Ces agents impliqués dans la manipulation ontologique des données sont détaillés ci-après.

L'Agent *stockage des données* (Figure 8 Agent 1) est utilisé pour stocker les informations reçues et vérifier la capacité à décoder l'information en communiquant avec l'agent ontologie.

Les informations sont stockées en XML dans une base où les données sont indexées. Une fois l'accord d'utiliser les données reçues, il envoie les données au SI. Il a donc également pour charge de transformer les données au format local du SI. Dans le cas où le format d'entrée/sortie des SI n'est pas ouvert, les messages seront reconstruits à partir de déductions de formats, basés sur l'échange de messages tests avec le SI.

L'Agent *Ontologie* (Figure 8 Agent 2) est lié à un référentiel d'ontologies locales, il vérifie la cohérence des informations reçues relatives à l'ontologie locale et décide si les données peuvent être exploitées. La classification d'une donnée (au format XML) est réalisée par calcul de proximité avec les concepts présents dans une ontologie OWL (Gandon, et al., 2008). Un pourcentage de vraisemblance est déduit de la présence/absence de termes au niveau de sa structure et des seuils de reconnaissance sont appliqués. Si la donnée est reconnue, il renvoie à l'agent de stockage de données l'information et l'ontologie à utiliser. Sinon, il demande à l'agent de communication de déclencher un début de dialogue avec l'agent émetteur pour obtenir l'ontologie appropriée. Le scénario de communication utilisé est celui décrit dans le cas b section 3.3 de présentation des ontologies éphémères. Cet agent gère également la validité des ontologies. Il supprime ou décline (*suppressed or legacy ontology*), dans la base locale, les ontologies atteignant leur limite de validité. Notons que des données peuvent parfois être reconnues ou ignorées à tort.

L'Agent *Communication* (Figure 8 Agent 3) reçoit les informations de l'extérieur qu'il transmet à l'agent 1. S'il est informé de l'incapacité à les utiliser, il va initier une conversation avec l'agent respectif de l'expéditeur des données pour définir les modalités pour recevoir l'ontologie appropriée. Le dialogue d'Agents est porté par des messages au format du protocole de communication. Dans cette approche, HLA est la solution technique retenue. Le composant est codé en JAVA avec l'utilisation du RTI open source poRTIco (PoRTIco, 2012). Le protocole de communication réseau est celui employé par poRTIco : TCP/IP.

Enfin, la couche « *Local RTI Component* » (LRC) est le niveau inférieur, c'est le niveau service et données. Il met en œuvre les technologies utilisées pour l'échange d'informations informatisées. Les séquences d'informations à échanger sont orchestrées par un moteur de Workflow visible au bas de la Figure 8. Cet outil permettra de modéliser la dynamique du processus collaboratif, *i.e.* la séquence d'information à traiter et l'allocation d'intervention des ressources. Un formalisme de Workflow (Van Der Aalst, et al., 2000), (WfMC, 1999)) graphique est présenté à titre illustratif Figure 8. Le formalisme définitif devra contenir les éléments descriptifs : tâches et contrôleurs de flux pour diriger les informations entre les tâches, (voir [R11]). Cet outil sera hébergé sur la plateforme. Dans l'exemple, on se focalise sur 2 tâches (fléchées sur la Figure 8) du processus à exécuter en séquence. Chaque tâche fait appel à un SI d'une entreprise distribuée, et identifie les informations à échanger avec le SI. Dans le flux transitent donc les informations et les ontologies. Le bus est orchestré par HLA sur une base réseau TCP/IP sécurisé. Comme spécifié en introduction de cette section, nous nous efforçons de construire, par briques complémentaires, cette plateforme dans nos travaux.

4.2.5 Bilan des Plateformes d'Interopérabilité

Cette section propose une comparaison entre les cinq plateformes HLA, présentées ci-avant, et leurs cartographies dans le cadre l'Interopérabilité d'Entreprise. Une représentation graphique de la comparaison est illustrée figure 6.

La première plateforme MCDVP (section 4.2.3.8.1) est dédiée à l'implémentation technologique de l'échange de connaissances. Elle aborde à presque tous les niveaux d'abstraction les barrières technologiques. En particulier, toutes les barrières sont considérées au niveau des données. Les considérations organisationnelles et conceptuelles sont hors

champ. Le problème d'interopérabilité est lié aux questions techniques. La vision du niveau décisionnel et stratégique n'est pas présente dans cette représentation technique.

La deuxième plateforme CEMF-DO (section 4.2.3.8.2) est une plateforme dédiée à l'entreprise distribuée. Dans ce cas, le processus est bien décrit dans un modèle. L'entreprise est modélisée à l'aide d' (UEML, 2003) et la synchronisation est assurée entre les modèles de processus. Cependant, les rôles des ressources dans l'organisation ne sont pas intégrés au niveau des données. En outre, aucune intégration directe technologique des concepts du niveau business n'est fournie.

La troisième plateforme MISSION (section 4.2.3.8.3) est dédiée à la simulation distribuée de la chaîne d'approvisionnement et de production. L'interface utilisateur est générée sur le profil de l'utilisateur en fonction de ses responsabilités. Cependant, la modélisation conceptuelle de l'entreprise et de ces processus n'est pas abordée.

La quatrième plateforme LSIS-WME (section 4.2.3.8.4) est dédiée à l'interopérabilité des applications dans le contrôle d'une chaîne de production. Elle est centrée sur la modélisation des processus et leurs transformations au niveau des données pour assurer l'exécution du processus. Cependant, la modélisation conceptuelle du niveau décisionnel et stratégique de l'entreprise n'est pas abordée.

La cinquième plateforme SMA/HLA est notre objectif (section 4.2.4). Elle sera dédiée à l'interopérabilité des entreprises pour l'échange de documents. Elle est centrée sur la dernière approche en matière d'interopérabilité : l'approche fédérée. Elle utilisera les ontologies et les agents logiciels afin d'être agile à toute situation nouvelle (ex. un nouveau projet, contrats, etc.). Il n'est cependant pas prévu qu'elle aborde directement le cahier des charges au niveau décisionnel mais commence plutôt à partir du niveau de modélisation des processus.

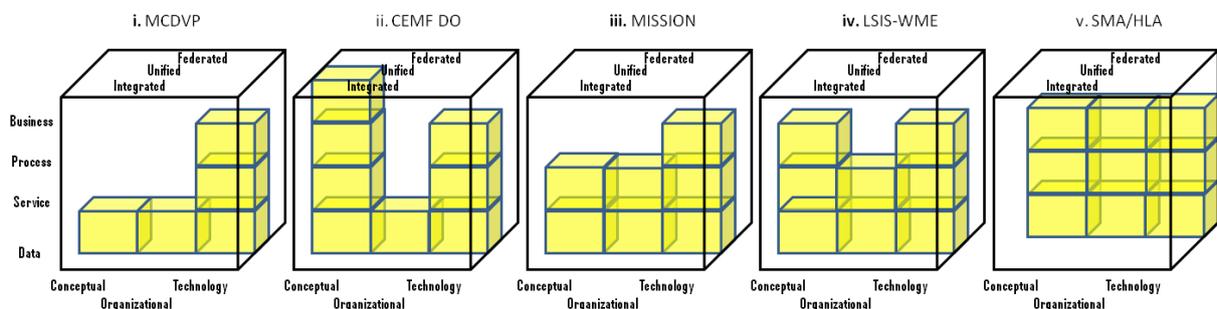


Figure 9. Comparaison 3D des Plateformes d'Interopérabilités Compatibles HLA

En résumé, il est possible d'observer que la dimension technologique de l'interopérabilité est bien traitée dans la majorité des plateformes. A l'inverse, les barrières organisationnelles ne sont pas bien identifiées. Certaines plateformes essaient de lutter contre cette barrière au niveau des services et des niveaux supérieurs. En outre, la barrière conceptuelle est principalement abordée à faible niveau d'abstraction (*i.e.* aux niveaux services et données), mais la plupart des plateformes ne considèrent pas (ou ne documentent pas) un niveau supérieur de spécification (*i.e.* au niveau processus, stratégique des entreprises). Enfin, la plupart des plateformes collaboratives ayant recouru à HLA sont développées par l'approche unifiée. Les perspectives de solutions par l'approche fédérée sont donc importantes.

Aucune plateforme existante n'est en mesure de résoudre toutes les barrières et couvrir toutes les préoccupations d'interopérabilité en utilisant une approche unique (unifiée, intégrée ou fédérée). Certains domaines d'interopérabilité des entreprises (*i.e.* certaines briques du cadre d'interopérabilité tridimensionnel, introduit en Figure 4) demeurent non solutionnés.

L'étude met de plus en évidence que, même si les plateformes sont a priori prétendues collaboratives et interopérables, dans les faits l'effort visant à les rendre inter-interopérables n'est pas trivial. Une méthodologie de développement commune pourrait permettre de réutiliser les plateformes et de comparer plus simplement les différentes approches. La production de spécifications (par exemple des modèles conceptuels) aurait également pu faciliter l'interopérabilité. Ceci rejoint les arguments sur l'intérêt de proposer une méthodologie de développement commune, type MDA, MDI [R9], pour combiner les approches et cibler plus facilement les obstacles et les préoccupations d'un cas d'interopérabilité (étendre le « mur de brique » dans le cadre présenté en Figure 4).

4.2.6 Conclusion

Cette section a proposé tout d'abord un rappel des concepts d'Interopérabilité d'Entreprise. Nous avons ensuite présenté des plateformes d'échanges d'informations entre SI d'entreprises distribuées et hétérogènes, notamment en utilisant la norme HLA dans le domaine de la mise en interopérabilité des SI d'entreprises. Cet état de l'art a été présenté dans [I4], [O2] et [O3].

Nous avons introduit le concept d'une ontologie de domaine qui serait éliminée à l'issue d'un projet ou après une durée de validité écoulée, elle est nommée ontologie éphémère « *Short Lived Ontology* ». Cette non-persistance de la sémantique des informations renforce la confidentialité et l'agilité des systèmes. Enfin, la plateforme compatible HLA préserve la cohérence dynamique des informations échangées. L'agilité apportée aux SI des entreprises améliore donc leur potentiel d'interopérabilité avec leur environnement.

Cette section est conclue par une classification des fonctionnalités des plateformes dans le cadre tridimensionnel d'interopérabilité. Les capacités des plateformes sont discutées et font apparaître l'occultation de certains points de vue. Il peut être retenu, en particulier, les absences fréquentes des visions des niveaux décisionnaires ainsi que l'incapacité à transcrire certains concepts métiers et organisationnels des entreprises, dans les solutions développées.

A partir de l'identification des lacunes des approches existantes, grâce à l'apport d'HLA et à l'approche sémantique, nous avons décrit les fondements d'une nouvelle plateforme pour assurer la communication des SI d'entreprises distribuées fortement autonomes. Cette plateforme pourra exécuter l'échange d'informations entre entreprises sans ontologie globale et persistante, mais plutôt en recourant à des ontologies locales éphémères. Cette plateforme logicielle devra permettre aux systèmes locaux d'interpréter les informations extérieures par l'utilisation d'une ontologie locale, si elle est présente, ou par le dialogue d'agents logiciels avec d'autres entreprises pour son obtention. Pour la mise en œuvre, un accompagnement depuis les spécifications ou les systèmes existants jusqu'au nouveau système est nécessaire. Cette plateforme est l'objectif de nos travaux actuels et donc le point d'entrée des travaux présentés dans ce mémoire. Elle sera progressivement mise en œuvre et accompagnée de méthodologies. Les contributions complémentaires sont exposées dans les chapitres suivants.

Notre recherche, décrite dans les sections suivantes, consistera donc à modéliser progressivement ce système et son comportement par la simulation et la manipulation de concepts sémantiques. Tout cela dans le but d'augmenter la couverture d'interopérabilité du système. Ceci passera par la modélisation des concepts puis leur transformation en modèle exécutables. Des cas réels sont en cours d'étude dans le domaine de l'aéronautique, du service, du transport et des réseaux sociaux. Ils permettront de valider le modèle du système, sa transformation en système exécutable et enfin l'échange de données hétérogènes critiques entre partenaires multiples. Nous présenterons chronologiquement dans les sections suivantes ces travaux qui m'ont permis d'encadrer deux thèses [T1] [T2] et un post doctorat [P1].

4.3 Méthodologie Dirigée par M&S pour l'Interopérabilité d'Entreprise

4.3.1 Introduction

Depuis le début des années 2000, la Commission Européenne a identifié la problématique d'interopérabilité des entreprises comme un verrou scientifique et technologique critique. La section 4.2 a présenté des recherches qui ont contribué à l'*Enterprise Interoperability* (EI) par des développements de modèles, de méthodologies et de solutions opérationnelles présentant des architectures d'EI. Sur la base des résultats de ces projets, de nombreuses solutions d'EI ont été mises en œuvre pour aider les entreprises à collaborer avec leurs partenaires dans une entreprise étendue ou un réseau.

Suite à ces résultats, le contexte économique a continué d'évoluer, poussant les entreprises vers la constitution de réseaux dynamiques. Pour obtenir plus d'opportunités commerciales et rester compétitif face à la concurrence, les entreprises doivent tenir compte non seulement des partenaires commerciaux apparents avec un lien direct, mais aussi des partenaires commerciaux potentiels ayant une relation indirecte au sein du réseau. Ce contexte environnemental très dynamique et complexe nécessite de considérer tous les éléments coopératifs et compétitifs pour établir l'interopérabilité d'entreprise. Il est clair que les solutions d'interopérabilité d'entreprise « historiques », telles que les approches « intégrées » et « unifiées », identifiées dans le cadre présenté Figure 4, ne sont plus suffisamment efficaces pour satisfaire à un tel contexte économique. La recherche doit donc porter davantage sur la nature dynamique des liens de l'entreprise future au sein des écosystèmes. Pour cela, la recherche se tourne à présent vers l'approche dynamique « fédérée » du cadre d'interopérabilité. Cette approche repose sur l'interopérabilité établie « *on-the-fly* ». Théoriquement, le développement de l'EI selon l'approche fédérée fournira un environnement d'interopérabilité flexible et agile pour aider les entreprises à s'adapter plus facilement au contexte économique dynamique et évolutif. Cependant, la section 4.2.5 a identifié qu'il n'existe pas de mise en œuvre complète de l'approche fédérée. Ce champ de recherche reste donc ouvert, cet avis est conforté par les experts qui estiment que l'approche fédérée reste un défi de recherche prioritaire pour les années à venir (Charalabidis, et al., 2008).

A partir de ce postulat, nous avons identifié les défis suivants. L'entreprise doit être en mesure d'ajuster et d'adapter son système en permanence et quasiment sans délai pour répondre de façon dynamique aux partenaires potentiels. Pour s'adapter, l'enjeu consiste à effectuer « *on-the-fly* » des adaptations des systèmes partenaires, ceci nécessite des langages, des méthodes et des outils en support. Nous estimons que la capacité à restructurer les systèmes rapidement peut être guidée par la modélisation et un cycle de développement approprié. De plus, les systèmes existants sont peu documentés et en conséquence difficile à réutiliser. La réingénierie est donc un autre défi consistant à re-modéliser en collectant des informations pertinentes sur les systèmes existants concernés par l'interopérabilité. En synthèse, les restructurations nécessaires pour établir dynamiquement l'interopérabilité par des services « *plug-and-play* » ne pourront donc pas se faire sans la modélisation des systèmes et des mécanismes (méthodologies) capables de connecter les niveaux supérieurs d'abstraction (décisionnels), avec les niveaux inférieurs (applications techniques). Ce sont les défis traités de cette section.

Nous présenterons ci-après, la méthodologie que nous avons élaborée. Puis, nous détaillerons les travaux effectués dans la Thèse de Zhiying Tu [T1], co encadrée avec David Chen, qui s'inscrivent dans ce contexte. Ces travaux ont permis d'opérationnaliser une partie des concepts de la plateforme d'interopérabilité présentée section 4.2.4 à partir de la découverte et la transformation de modèles, d'HLA et des services web.

4.3.2 Méthodologie Dirigée par les Modèles « d'une idée vers un exécutable »

L'état de l'art en modélisation d'entreprise témoigne de l'absence d'une méthodologie standardisée qui permettrait de partir des modèles d'entreprises vers la simulation distribuée de ces modèles (par exemple pour obtenir des validations) ou la mise en œuvre d'un SI distribué tout en prenant en compte le problème d'interopérabilité. Nous avons proposé d'explorer les méthodologies existantes de transformation de modèles en vue de rationaliser les étapes de transformation.

4.3.2.1 MDA (Model Driven Architecture)

La première méthode étudiée est *Model Driven Architecture* (MDA). Cette méthodologie définie et adoptée par le l'Object Management Group (OMG) en 2001 (version 2.0 (OMG, 2003)) est conçue pour promouvoir l'utilisation de modèles et de leurs transformations afin d'implémenter différents systèmes. Elle est basée sur une architecture définissant quatre niveaux (Figure 10), qui va des considérations plus générales aux considérations spécifiques.

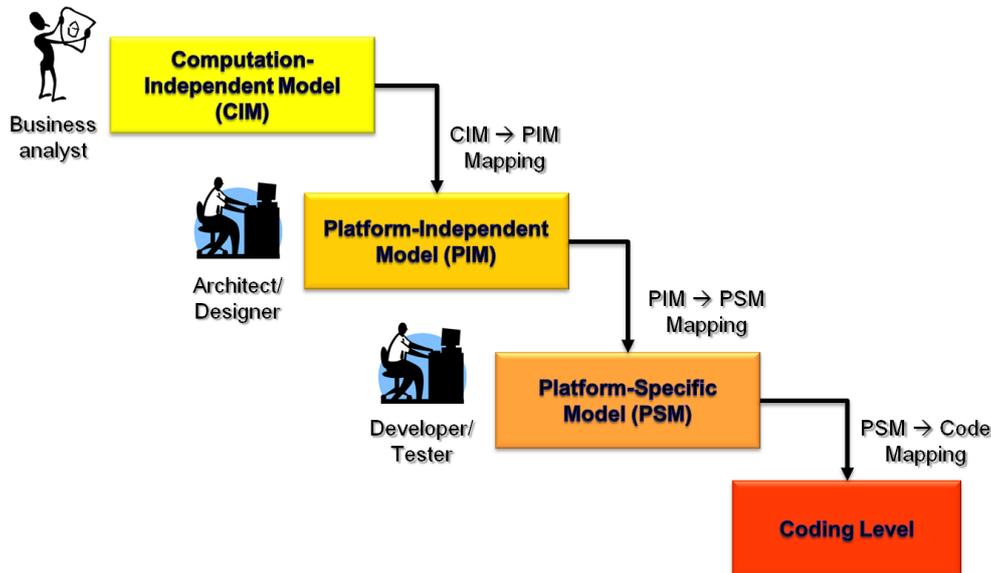


Figure 10. Cadre de Référence de la Méthode MDA

Niveau CIM (Computation Independent Model) : modélise l'ensemble du système et de son environnement. En outre, il est nommé « modèle de domaine » il décrit tous les modèles du système (fonctionnel, organisationnel, décisionnel, processus) avec une vision indépendante de la mise en œuvre.

Niveau PIM (Platform Independent Model) : modélise le sous-ensemble du système qui sera mis en œuvre.

Niveau PSM (Platform Model Specific) : modélise en prenant en compte les spécificités liées à la plateforme de développement.

Niveau de codage : ce dernier niveau est généralement constitué du code du SI d'entreprises ou d'autres applications (ESA: *Enterprise Application Software*).

Pour compléter la description MDA, un modèle de description de plateforme, utilisé pour la transformation entre le niveau PIM et le niveau PSM, est fréquemment ajouté à ces quatre types de modèles. De façon générale, les quatre niveaux d'abstraction standards ne possèdent pas de frontières claires, le passage d'un niveau à l'autre est à définir par les modélisateurs.

4.3.2.2 MDI (Model Driven Interoperability)

L'approche « *Model Driven Interoperability* » (MDI) consiste à considérer les problèmes d'interopérabilité aux différents niveaux de modélisation de l'entreprise. Ce qui se démarque de la majorité des cycles de développements actuels où l'on ne se préoccupe de ce problème qu'à l'étape de codage.

MDI a été réalisé par le groupe de travail 2 (GT2) du réseau d'excellence INTEROP-NoE. Il visait à définir une approche inspirée de MDA (Bourey, et al., 2007). L'objectif est de considérer et résoudre le problème d'interopérabilité à chaque niveau d'abstraction MDA. L'interopérabilité ainsi traitée à un niveau doit se propager par des techniques de transformations de modèles reliées sur le plan vertical entre les différents niveaux d'abstraction mais également assurer l'interopérabilité horizontale à chaque niveau des modèles avec leur environnement. Le cadre général de l'approche proposée est rappelé dans la Figure 11. Pour l'entreprise, l'intérêt de cette méthodologie, basée sur la transformation de modèle, est de permettre un suivi complet depuis l'expression des besoins de l'entreprise jusqu'au codage d'une solution. Cette approche doit amener une plus grande flexibilité notamment par l'automatisation de ces transformations.

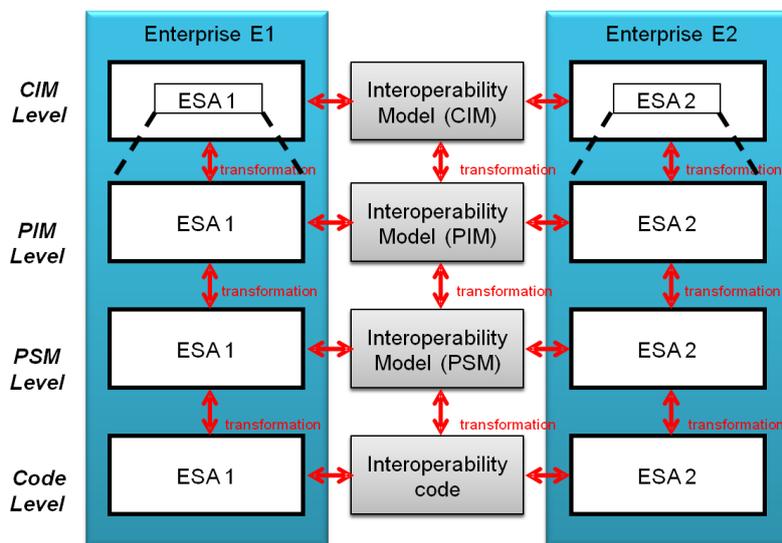


Figure 11. MDI Method Reference Framework

Dans le cadre du GT2, des expérimentations ont été réalisées et, en particulier, l'étude de faisabilité pour transformer les modèles GRAI de niveau CIM (Chen, et al., 2007) vers UML au niveau PIM (Bourey, et al., 2007). Ces travaux arrivent en complément du cadre défini dans ATHENA permettant de définir des profils UML pour tenir compte des architectures orientées service au niveau PIM (Benguria, et al., 2007). Ces résultats ont été consolidés par les résultats présentés dans (Touzi, 2007) qui a proposé une méthode d'interopérabilité par transformations de BPMN à UML dans le contexte d'architecture orientée services.

Néanmoins, si le bien-fondé de la méthodologie est démontré, aucune validation industrielle à grande échelle n'a encore été réalisée. Le projet ISTA3 (ISTA3, 2008) a notamment eu pour but de démontrer ces concepts dans une application du monde industriel. Différentes propositions méthodologiques ont été comparées et testées en mettant l'accent sur le modèle d'interopérabilité. Cependant, il reste toujours à faire progresser la flexibilité de la méthode et du processus de transformation MDI de façon à définir, suivre et implémenter une interopérabilité dynamique qui est recherchée dans le cadre de l'approche fédérée.

4.3.2.3 HLA FEDEP

HLA propose également une méthode de développement du cycle de vie d'un fédéré et des fédérations sur la base du cycle de génie logiciel en cascade. Ce cycle de vie est nommé processus de développement et d'exécution de la Fédération (FEDEP) (IEEE, 2003).

Dès le début de l'élaboration de la norme HLA, un besoin a été identifié dans le développement des fédérations HLA. Ce besoin est caractérisé par un degré élevé de flexibilité dans le processus de composition et d'exécution d'applications HLA, il prend en compte les objectifs d'une application « composée » ou *SoS*. Le but de FEDEP (Figure 12) est d'éviter le redémarrage *ex nihilo* à chaque nouvelle construction de la fédération et la réitération de questions déjà traitées portant sur la façon dont les applications HLA ont été construites et comment elles fonctionnent. En effet, il a été reconnu que le processus de développement et d'exécution des fédérations HLA varie considérablement en fonction des différents designers impliqués.

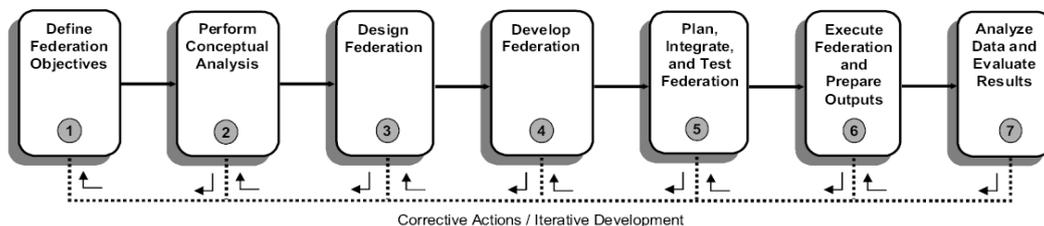


Figure 12. *Federation Development and Execution Process (FEDEP)*

Étape 1 : Définition des Objectifs de la Fédération : les futurs utilisateurs de la fédération et l'équipe de développement définissent et conviennent d'un ensemble d'objectifs et documentent ce qui doit être effectué pour atteindre ces objectifs.

Étape 2 : Réalisation d'une Analyse Conceptuelle : sur la base des caractéristiques d'un espace de problème, une représentation appropriée du domaine du monde réel est créée.

Étape 3 : Conception de la Fédération : les fédérés réutilisables sont identifiés et sont pris en compte dans la fédération. Les activités pour la modification des fédérés et / ou la création de nouveaux fédérés sont exécutées. Les caractéristiques requises par la fédération sont affectées aux fédérés et un plan est défini en répartissant les efforts pour le développement de la fédération.

Étape 4 : Développement de la Fédération : le « *Federation Object Model* » (FOM) est développé. Les accords entre les fédérés sont établis sur les droits de la base de données et des algorithmes qui les manipuleront. Enfin, de nouveaux fédérés et/ou des modifications des fédérés existants sont appliquées.

Étape 5 : Planification, Intégration et Essai de la Fédération : toutes les activités d'intégration nécessaires pour la fédération et les tests sont exécutées et testées pour s'assurer des conditions d'interfonctionnement.

Étape 6 : Préparation d'Exécution de la Fédération et des Sorties : la fédération est exécutée et les données produites par l'exécution de la fédération sont prétraitées. Cette étape est une addition en ce qui concerne la première version du standard; elle marque la nécessité d'une phase de calibration et de classification des résultats.

Étape 7 : Analyse des Données et Evaluation des Résultats : les données produites par l'exécution de la fédération sont analysées, estimées et les résultats sont présentés dans un rapport à l'utilisateur.

4.3.2.4 Conclusion sur les Méthodologies de Transformation de Modèles

Des similarités sont apparues en comparant les étapes des différentes méthodes. Néanmoins il subsiste un manque de considération pour l'étude de la distribution dans MDA / MDI. Par ailleurs, à un haut niveau d'abstraction, la méthode HLA FEDEP ne se concentre pas sur l'EI, sa préoccupation est l'interopérabilité technique. Plusieurs travaux essayent donc de combiner plusieurs méthodes [C13]. Nous proposons de définir une méthodologie de développement spécifique du modèle d'entreprise basée sur la convergence des méthodes HLA FEDEP et MDA/MDI. Elle doit clarifier et systématiser le processus de développement des modèles de l'entreprise. Nous avons limité notre méthodologie à la transformation de modèles d'entreprises distribuées interagissant de manière unifiée ou fédérée. Ainsi qu'à la mise en œuvre de Sis résultants de cette méthode grâce à la norme HLA.

4.3.2.5 Méthodologie de Transformation Unifiée pour l'Exécution Distribuée de Modèle d'Enterprise

Nous avons présenté, dans la section 4.2.4, différentes mises en œuvre de modèles d'entreprises en utilisant HLA, cependant chacune utilise son propre cycle de développement. De ce fait, la comparaison des méthodes et modèles n'est pas évidente. Outre pour la mise en œuvre ; nous proposons une méthode commune par la convergence des étapes de HLA FEDEP MDA, MDI. Ce cycle de vie propose des étapes standardisées pour atteindre la simulation ou la mise en œuvre d'un modèle d'entreprise conceptuel, il est représenté dans la Figure 13. Cela doit aider la rationalisation, la réutilisation et l'évolution des connaissances et donnera une métrique commune pour comparer les solutions de développements. Nous avons publié la première version de cette méthodologie dans [I4] [C3] [R9] [R10].

En fin de processus, le modèle d'entreprise fédéré généré par cette méthode peut être réutilisé et interfacé avec des modèles hétérogènes compatibles HLA. Par exemple, les modèles fédérés de « clients » peuvent être connectés à des fédérés « entreprises » en amont et peuvent être connectés en aval aux fédérés « sous-traitants de l'entreprise ». Les résultats obtenus par simulation sont utilisés pour valider la conformité des modèles par analyse d'un ensemble de test. Dans le cas où le cahier des charges de la méthodologie n'a pas été respecté, une correction ou rétroaction sera effectuée. FEDEP décrit cela dans la dernière étape. Nous détaillons dans la suite les phases de cette nouvelle méthodologie.

Phase 1 : Dans un premier temps, les objectifs de la fédération d'entreprises doivent être définis. Fondamentalement, l'objectif commun dans cette méthodologie consiste à définir une fédération facilitant l'interopérabilité des modèles d'entreprise. Cette étape est considérée comme le niveau domaine CIM de MDA et le niveau interopérabilité CIM de MDI. Néanmoins, un modèle conceptuel est nécessaire tel que décrit dans la deuxième étape FEDEP. Dans notre cas, ce modèle contient les modèles d'entreprise des entités et les actions qui décrivent les échanges entre le SI de l'entreprise et les systèmes externes.

Phase 2 : Cette deuxième étape encapsule les modèles d'entreprise en fédérés HLA. La méthode de traitement des informations reçues et envoyées par les modèles à la fédération est définie. Ceux-ci peuvent se conformer aux mécanismes proposés dans des algorithmes de synchronisation de [R13]. Nous portons une attention ici à réutiliser les modèles d'entreprise existants. Les fédérés de modèles d'entreprise non existants sont créés. De plus, dans cette étape, nous abordons aussi la structuration des informations à échanger, en d'autres termes, cette étape définit l'ontologie distribuée. Ce niveau considère le niveau PIM de MDA / MDI.

Phase 3 : Dans la troisième étape, la méthodologie mappe les connexions d'interopérabilité entre les modèles d'entreprises en interactions et objets HLA. Ensuite, ces

données sont structurées pour générer un « *Federation Object Model* » (FOM) associé. La stratégie concernant la confidentialité des données est aussi explicitement abordée dans cette étape. Un modèle d'entreprise qui possède une relation d'entrée avec une entreprise « influente » sera « souscripteur » d'une interaction de classe en appelant la méthode HLA *subscribeInteractionClass()* de *RTIAmbassador*. Cette interaction étant alimentée par le flux orienté d'informations publiées par l'entreprise qui influence. Un modèle d'entreprise possédant une relation de sortie « publiera » sur l'interaction de classe à l'aide *publishInteractionClass()*. La méthodologie peut proposer également de générer, dans le FOM, divers objets permettant d'échanger des informations entre entreprises locales ; par exemple le suivi de mesure de la performance. Dans ce cas, une entreprise publiera un suivi de données d'entreprise et d'autres entreprises pourront s'y abonner. Toutes ces données pourront bénéficier du mécanisme de confidentialité fourni par statut dans HLA. En outre, le respect du temps pour les interactions est défini par l'usage d'informations « datées ». Les messages sont émis avec un datage du temps logique local de l'entreprise émettrice et le RTI les traite avec un algorithme de synchronisation afin de respecter la causalité.

Phase 4 : La fédération est exécutée. Les résultats obtenus par simulation sont utilisés pour la validation des modèles par analyse du comportement du système dans son environnement. Dans le cas où le modèle ne respecte pas un objectif spécifié, la méthodologie de spécification permet la correction par *retro engineering* comme décrit dans la dernière étape FEDEP.

Enfin, le modèle d'entreprise fédéré généré par cette méthode peut être réutilisé et interfacé avec d'autres modèles hétérogènes compatibles HLA. Par exemple, les modèles fédérés « client » et « sous-traitants de l'entreprise » peuvent être connectés à d'autres fédérations d'entreprises hétérogènes. Nous avons publié ce résultat dans [R9], [R10] et [O3].

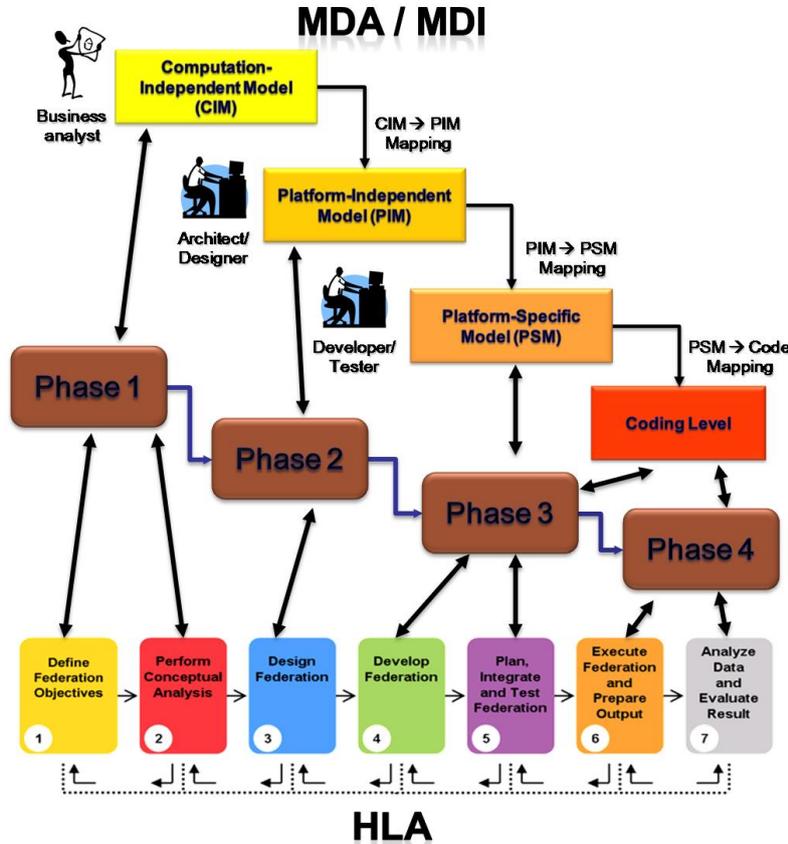


Figure 13. Nouvelle Méthodologie Convergente de Transformation de Modèles

4.3.3 Contribution de la thèse de Zhiying Tu

Les travaux effectués dans la thèse de Zhiying Tu [T1] ont permis d’approfondir et d’opérationnaliser la méthodologie introduite au point précédent. La contribution globale a été présentée dans [C12] [C14] [R2] [R3], elle est résumée par la Figure 14 puis décrite ci-après.

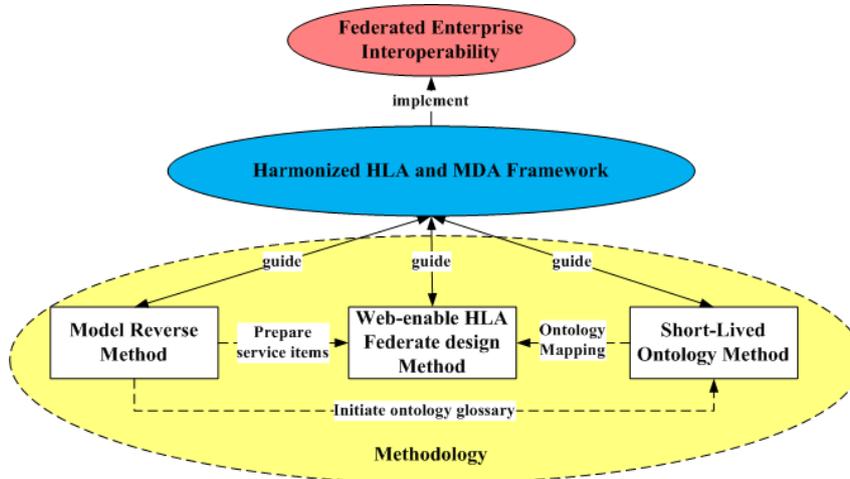


Figure 14. Contribution Globale de la Thèse de Zhiying Tu

Premièrement, le cadre harmonisé et réversible basé HLA (présenté Figure 14) vient raffiner celui proposé dans la Figure 13. Ce cadre comprend trois concepts principaux : (1) « harmonisé » signifie que ce cadre est synthétique, il se compose de plusieurs techniques. Comme le cadre de la Figure 13 le montre, nous proposons un nouveau cycle de cinq étapes de vie du développement qui aligne MDA et HLA FEDEP. Ce cadre fait appel aux web services afin d’améliorer la flexibilité et la compatibilité du système HLA. (2) « réversible » signifie que ce cadre utilise la technique de l’ingénierie inverse des modèles pour découvrir une partie des modèles à partir de l’ancien système. La technique d’ingénierie inverse de modèle vise à éviter la reconstruction complète d’un système par une meilleure réutilisation de l’ancien système. L’objectif est d’accélérer le développement et réduire les coûts. (3) « HLA » signifie que ce cadre se consacre au développement d’application basée HLA. Le RTI utilisé dans cette approche est un open source RTI (PoRTico, 2012). Comme mentionné précédemment dans le cadre harmonisé, les services web seront utilisés pour améliorer l’interopérabilité web d’HLA. Ainsi, l’approche HLA proposée est basée sur le nouveau standard « *HLA Evolved IEEE 1516TM-2010* » (IEEE, 2010).

Deuxièmement, pour étayer le « *Harmonized and Reversible HLA Based Framework* », une méthodologie a été élaborée, qui se compose de trois méthodes: « *model reverse model* », « *web-enable HLA federate design method* », and « *short-lived ontology method* ». Cette méthodologie a proposé une nouvelle façon de soutenir le développement de l’approche fédérée de l’interopérabilité des entreprises en réutilisant des méthodes existantes, des architectures et des technologies, tels que : MDA, *Model Reverse Engineering*, HLA, les services web et les ontologies. Plus précisément, cette méthodologie : (1) utilise MDA pour formaliser l’architecture du système et les relations entre les systèmes, (2) applique le *Model Reverse Engineering* pour réutiliser et harmoniser les différents systèmes/composants dans le but de créer l’environnement d’interopérabilité pour les SIs d’entreprise, (3) utilise les fonctionnalités de HLA et des services web comme assistance technique, et (4) utilise l’ontologie pour l’analyse de l’information. Après la définition de la méthodologie, une Architecture basée « *Reverse Engineering, Model Driven et HLA* » a été élaboré. Cette architecture a été la base de développement d’un outil logiciel. L’utilisation de cet outil logiciel a été illustrée par une étude de cas, présentée dans [C12] et [R2].

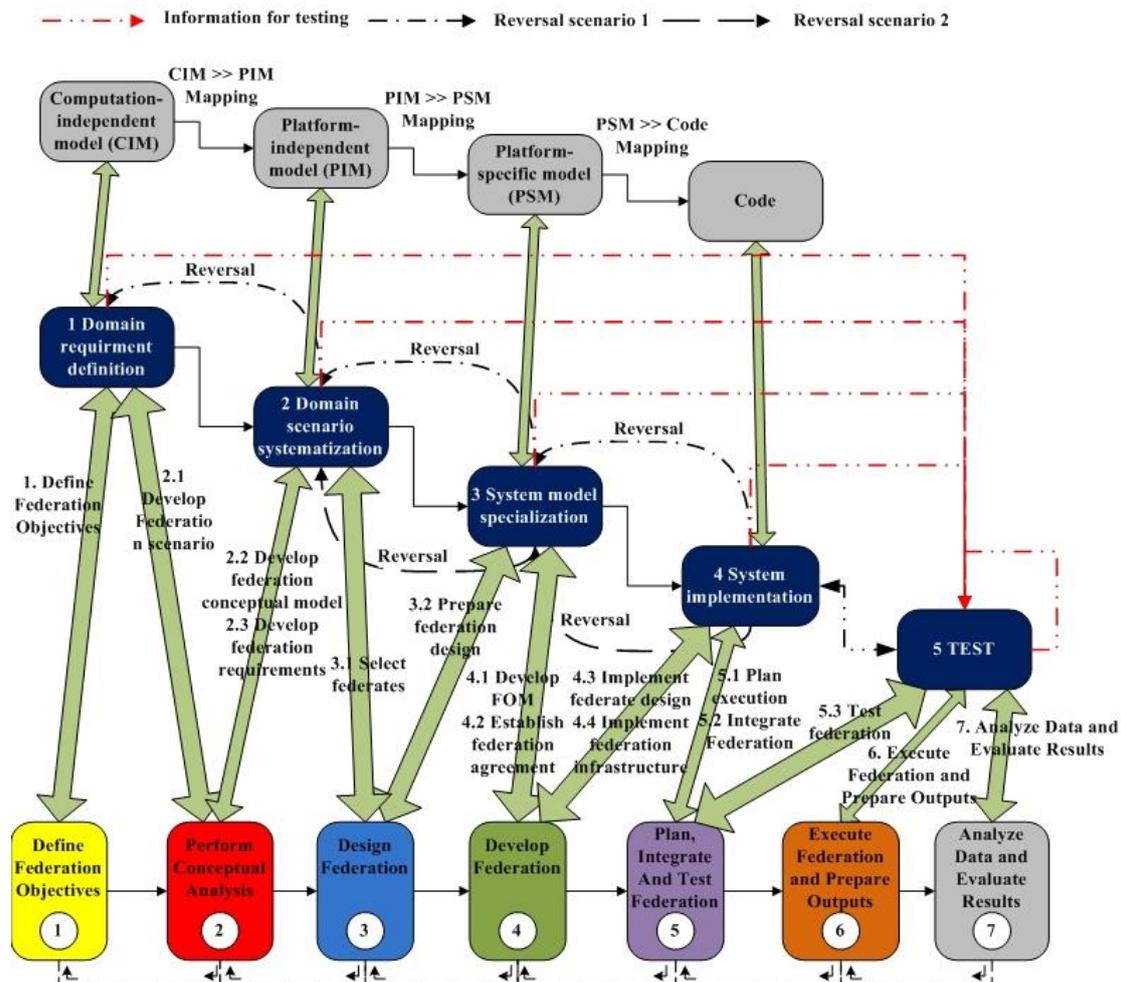


Figure 15. Cadre de Développement Harmonisé et Réversible basé HLA

Le cadre « *Harmonized and Reversible HLA based framework* » (Figure 15) définit la ligne directrice pour la mise en œuvre des trois méthodes mentionnées ci-dessus. Ces trois méthodes se complètent également afin d’obtenir le résultat escompté de l’approche fédérée de l’interopérabilité des entreprises. Nous avons publié ce résultat dans [R2].

Ce cadre et la méthodologie ont été mis en œuvre dans un outil logiciel appelé « *Model driven and HLA based Reverse Engineering Tool* ». L’objectif et la fonctionnalité de cet outil peuvent être identifiés en décomposant son nom :

- Le terme « *Reverse Engineering* » signifie que l’outil doit pouvoir acquérir des modèles de SI en « rembobinage » (redécouverte) des systèmes existants.
- Le terme « *HLA based* » signifie que la plateforme cible de cet outil est compatible HLA. L’utilisateur se connecte à la plateforme par un fédéré HLA.
- Le terme « *Model Driven* » signifie que cet outil doit résoudre les problèmes d’interopérabilité basés sur des modèles de systèmes de remises en arrière, puis réformer les modèles dans les modèles interopérables, qui peuvent être convertis en code exécutable en fonction de la plateforme cible.

Ainsi, l’objectif de cette plateforme est un outil logiciel de communication interopérable basée sur HLA. Les modules fonctionnels de cet outil sont (1) un module « *Build Time* », gérant l’inversion du modèle, l’ajustement du modèle, et la génération du modèle cible & du code, (2) un module « *Run Time* » gérant l’envoi des messages et la gestion des messages. L’architecture de cet outil, illustrée Figure 16, a été publiée dans [R3] et est détaillée ci-après.

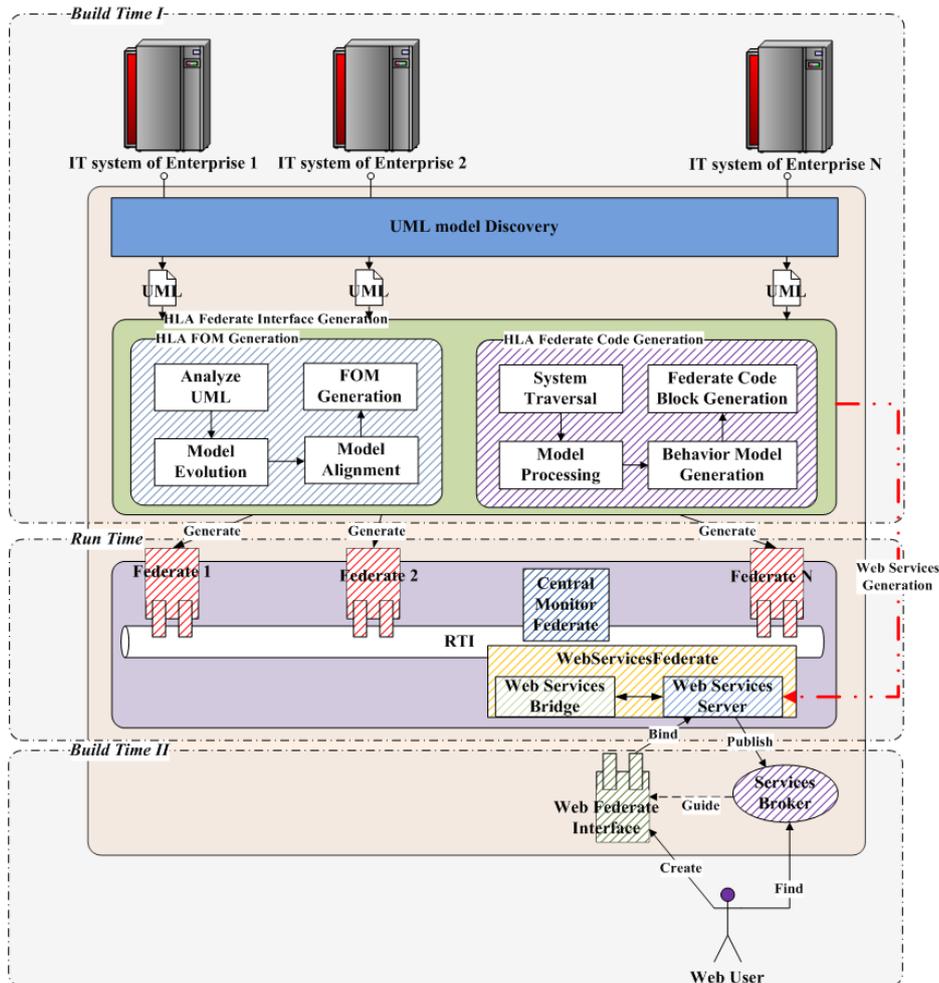


Figure 16. Architecture du «Model driven and HLA based Reverse Engineering Tool»

La partie « **Build Time I** » est la phase initiale. Elle doit implémenter la méthode de « *model reverse* » et le développement de la Fédération HLA basé sur le RTI poRTico. La méthode « *model reverse* » comprend la découverte du modèle, son ajustement et la génération du modèle cible et du code. Elle est chargée de préparer l’environnement de simulation permettant l’établissement rapide et dynamique de l’interopérabilité du SI. Elle est également responsable de la préparation des services pour le développement de « *web-enable federate* » et d’initier un glossaire ontologique local pour les participants web, qui visent à mettre en œuvre la compatibilité agile de l’environnement.

La partie « **Build Time II** » est une phase optionnelle. Elle n’est réalisée que si un nouveau participant veut se joindre via le web. Cette partie met en œuvre la compatibilité agile de l’environnement qui permet aux participants web de rejoindre la collaboration en « *plug-and-play* ». Cette partie se compose des méthodes « *web-enable HLA federate design* » et « *short-lived ontology* ». La méthode « *short-lived ontology* » est spécifiée mais reste une perspective pour permettre aux participants web d’initier une ontologie glossaire locale.

La partie « **Run Time** » assure la simulation, y compris l’envoi et la gestion des messages. Il s’agit de l’échange et l’analyse des informations transitoires. Pendant ce temps, la production et la connexion de nouveaux « *Web-Enable Federate* » est possible.

Un outil Java a été implémenté [R2]. Il génère des composants compatibles avec le RTI poRTico. Un cas de logistique industrielle a été testé sur cet environnement dans le stage de Master de Zhenchuan Zhag [M1] en 2010 puis dans celui de Wei Du [M3] en 2012.

4.3.4 Conclusion

Pour résumer, le travail effectué dans la thèse de Zhiying Tu [T1] a proposé une méthodologie d'ingénierie « réversible » dirigée par les modèles et basée HLA. La méthodologie regroupe et harmonise un ensemble de méthodes existantes, des architectures et des technologies, pour soutenir l'approche fédérée d'interopérabilité des entreprises. Cette méthode est axée sur un cycle de développement normalisant la mise en place de l'interopérabilité. Elle se base sur un processus semi-automatisé d'ingénierie inverse des modèles permettant de recueillir des données des systèmes existants pour la réingénierie rapide des SIs d'entreprise obsolètes. Cette méthodologie réduit la complexité de mise en œuvre en utilisant la norme « HLA évoluée » qui supporte l'interaction des simulations et des SIs des entreprises partenaires hétérogènes. Elle intègre aussi la conception de fédérés web qui permet aux entreprises de s'adapter et d'accueillir dynamiquement des partenaires via le web. Cette méthode, permettant d'interopérer en ajoutant rapidement et simplement de nouveaux partenaires, s'inscrit donc pleinement dans l'approche fédérée de l'EI.

Un outil Java d'ingénierie inverse, entraîné par les modèles et générant un code HLA a été développé en implémentant cette méthodologie. Il met en œuvre une méthode de parcours du système obsolète, des règles de réduction pour traiter les modèles découverts et un algorithme de génération de composants HLA et de services web. Il comprend aussi un générateur de glossaire d'ontologie locale, pouvant utiliser l'alignement d'ontologies (présenté section 4.4), pour faciliter la connexion depuis le web. Cet outil a été validé sur l'étude d'un modèle logistique. Cependant, l'inversion de modèle et l'ontologie éphémère n'ont pas été pleinement exploitées, en raison des limitations temporelles de cette recherche, principalement, doctorale.

Les travaux restant à effectuer considèrent essentiellement la méthode de modélisation inverse du comportement des systèmes. La thèse de Zhiying Tu [T1] a utilisé un modèle de comportement pour générer un code de simulation. Cependant, le modèle de comportement représente une logique simplifiée aux interfaces du SI. Si nous enrichissons ce modèle de comportement avec, par exemple des règles de définitions de classes équivalentes, alors ce modèle de comportement pourrait non seulement représenter la logique du système, mais aussi la logique complexe de l'entreprise. Le cadre proposé donne aussi un premier positionnement du concept d'ontologie éphémère. Cette ontologie pourrait être davantage utilisée pour l'intégration des concepts découverts. Elle pourrait ainsi structurer les données découvertes de sorte à réduire les opérations manuelles pour définir un nouveau modèle. L'ontologie éphémère décrit un mécanisme d'apprentissage qui pourrait aussi mettre à jour le système. Sur la base des découvertes de modèles, l'environnement pourrait donc réaliser une mise à jour automatique, informer les fédérés et améliorer les services web en même temps.

4.3.5 Résultats

La **thèse de Zhiying Tu** [T1] a été financée par une bourse ministérielle et co-encadrée 50% avec David Chen (Sept 2009 – Dec 2012). Les travaux de ce champ ont produit **4 articles de journaux avec IF** [R2] [R3] [R9] [R10] et **2 chapitres d'ouvrage** [C4] [C2], **1 papier invité** [I4] et 5 articles de conférences (un Best Paper). Zhiying Tu est actuellement **Professeur Associé à HIT** (Harbin, China).

Ces travaux ont également été réalisés par **des stages de Master** :

- l'encadrement à 100 % de Zhenchuan Zhang (Mars-Juillet 2010). “Distributed enterprise IS interoperability based on HLA/SOA”, 1 article de conference,
- l'encadrement à 100% de Wei Du (Mars-Juillet 2012) “Behavior Model Discovery to Support Reverse Engineering of Object-Oriented Software”

4.4 Contribution à l'Interopérabilité des Entreprises par Alignement d'Ontologies

4.4.1 Introduction

Nous avons identifié dans la plateforme que nous souhaitons développer (section 4.2.4) l'exigence d'interopérabilité accrue pour les collaborations éphémères entre les entreprises partenaires. Dans cette plateforme plusieurs dimensions et préoccupations sont impliquées dans le développement de l'EI fédérée. En particulier, au niveau des points de vue techniques et conceptuels, l'hétérogénéité sémantique des concepts manipulés par les partenaires peut conclure à l'incompréhension des informations échangées. Ce qui représente un obstacle majeur pour la réalisation de l'interopérabilité des entreprises.

Pour faire face à l'hétérogénéité sémantique, les approches basées sur les ontologies sont largement utilisées en raison de l'évolution rapide des technologies connexes du web sémantique et les avantages qu'elles apportent pour faciliter l'interopérabilité sémantique. Le travail de thèse de Fuqi Song [T2], co-encadrée avec David Chen, a apporté un alignement d'ontologies pour contribuer à l'interopérabilité fédérée des entreprises en mettant l'accent sur l'interopérabilité des données au niveau sémantique. L'alignement d'ontologies cherche des correspondances sémantiques entre les différents SI et joue un rôle important pour permettre l'interopérabilité sémantique. Cette thèse a proposé une technique d'agrégation d'alignements d'ontologies basée sur AHP pour contribuer à l'approche d'interopérabilité fédérée, dans l'objectif de l'interopérabilité des données d'entreprise au niveau sémantique.

Basé sur les travaux existants dans ce domaine et en réponse aux problèmes et défis restants, des travaux de recherche ont été menés visant à améliorer les approches d'alignement d'ontologies, ceci afin de faciliter l'interopérabilité de l'entreprise. La recherche de ces travaux vise à répondre à deux questions cruciales de l'alignement d'ontologies: (i) améliorer la capacité à découvrir des correspondances sémantiques, et (ii) améliorer la méthode d'agrégation par comparateurs « *Matchers* » en combinant les résultats de plusieurs techniques. Ceci est une brique dans la plateforme présentée en section 4.2.4.

En ce qui concerne la première question, la plupart des approches actuelles d'alignement d'ontologies cherchent des correspondances à partir du niveau lexical et du niveau structurel plutôt que directement au niveau sémantique. Les difficultés sont causées par la diversité et l'ambiguïté du langage naturel, qui est utilisé pour représenter les entités de l'ontologie. Dans notre travail, une approche d'alignement d'ontologies reposant sur les 'mots de base' (« *Core Word* ») est proposée en appliquant les connaissances de traitement du langage naturel (*Natural Language Processing*, NLP) et d'extraction d'information (*Information Extraction*, IE). La motivation de cette proposition est que l'étiquette de l'entité dans l'ontologie est généralement nommée par mot composé, qui combine plusieurs mots significatifs simples. Cependant, le plus souvent un seul mot du mot-composé représente le sens principal de l'entité entière. Ce type de mots est le mot clé (de base) « *core word* ». Nous soutenons que le constat de mots clés contribuera de manière significative à la découverte de correspondances sémantiques. Le processus de reconnaissance de mots de base est réalisé sur la base de règles prédéfinies et d'une partie du discours (*part of speech*, POS) de mots. Un algorithme de mesure spécifique est proposé sur la base du mot de base reconnu et des informations complémentaires pour calculer la similarité sémantique. La méthode basée sur les mots de base est proposée pour l'alignement d'ontologies. Pour gérer les diverses situations et améliorer la capacité d'adaptation, des adaptateurs au niveau lexical et au niveau structurel sont appliqués par les algorithmes de réutilisation suivants : distance d'édition (*edit distance*), n-gram et l'inondation de similitude (*similarity flooding*).

4.4.2 Contribution de la Thèse de Fuqi Song

Un axe de recherche important dans l’alignement d’ontologies repose sur l’agrégation de matchers et a attiré l’attention de beaucoup de chercheurs. Classiquement plusieurs adaptateurs sont composés pour procéder à l’alignement d’ontologies. Bien que de nombreuses méthodes basées multi-stratégies aient été proposées, des méthodes plus automatiques et dynamiques restent attendues afin d’améliorer les résultats combinés. Nous proposons une approche analytique basée sur « *Analytic Hierarchy Process* » (AHP) (Saaty, 1990) que nous appliquons à déterminer les poids de chaque matcher. AHP a déjà été utilisé, et validé, dans un très large éventail d’applications matures pour le calcul de pondération dans différents domaines, allant du E-learning à la prise de décision. Notre travail, propose tout d’abord d’aligner les ontologies par l’agrégation de matchers. Le processus d’apprentissage est effectué avec l’aide de trois indicateurs de similarité qui proviennent du niveau tout-ontologie. Cette méthode vise à automatiser l’ensemble du processus d’agrégation et à améliorer les résultats combinés. Notons que cette thèse a été effectuée dans le cadre du projet (SIMID, 2011) associant des partenaires du secteur aéronautique pour la définition d’un SI métier interopérable. Cependant pour des raisons de confidentialité, les données et les études ont été décontextualisées.

Nous proposons d’appliquer les méthodes d’alignement d’ontologies pour améliorer l’interopérabilité sémantique des données, et d’implémenter un système prototype de l’architecture axé sur les « matching multiples » d’ontologies. Cette architecture a été présentée dans [C11] [R4] [R5] et peut être utilisée dans des scénarios d’application différents en fonction des besoins spécifiques.

Basé sur les approches proposées, un prototype de système a été implémenté en Java pour l’évaluation et les utilisations futures. Ce système se compose de trois éléments principaux: un « pré-processeur », un « matcher » et un « agrégateur ». Il contient environ 5000 lignes de codes. Les expériences ont été réalisées en comparaison avec l’ensemble de données de la base de référence OAEI, et avec d’autres approches. L’évaluation a montré que les approches proposées ont obtenu des résultats prometteurs et ont atteint les objectifs escomptés.

Nous proposons 6 sous sections relatives à cette problématique ci-après. Les sections 4.4.3 et 4.4.4 rappellent brièvement l’alignement d’ontologies et AHP. La section 4.4.5 illustre comment identifier les mots clés « noyau » avec les règles et les différentes stratégies d’adaptation. La section 4.4.6 propose trois indicateurs de similarité et les utilise pour agréger les résultats avec AHP. La section 4.4.7 évalue l’approche proposée par comparaison avec les autres. Enfin la section 4.4.8 tire quelques conclusions.

4.4.3 Alignement d’Ontologies

L’alignement d’ontologies cherche à trouver des correspondances sémantiques entre une paire d’éléments d’ontologies différentes en identifiant les relations sémantiques. A partir du format de représentation de correspondance proposé dans (Euzenat, 2004), il existe deux types de correspondances pour les approches basées multi-comparateurs : intermédiaires et finales. La correspondance intermédiaire est découverte par un comparateur spécifique, puis plusieurs correspondances intermédiaires sont combinées dans une correspondance finale en utilisant une stratégie prédéfinie. À savoir, les correspondances finales sont utilisées pour aligner, alors que les correspondances intermédiaires sont utilisées pour générer ces correspondances finales. Une correspondance *ic* intermédiaire est définie comme :

$$ic = \{e_1, e_2, r, v, M, id\} \quad (1)$$

Où e_1 et e_2 sont des éléments de l'ontologie O_1 et O_2 à appairer. Respectivement, v désigne la confiance entre e_1 et e_2 identifié par un matcher M avec une relation r , qui pourrait être « égal », « sousClasseDe », « superClasseDe », etc. id est un identifiant unique pour cette correspondance. Une correspondance finale fc est similaire à la correspondance intermédiaire sans les informations concernant un comparateur spécifique M , définie comme :

$$fc = \{e_1, e_2, fr, fv, fid\} \quad (2)$$

Où, fr est un rapport provenant de relations de correspondances intermédiaires et fv désigne une confiance combinée de confiances de correspondances intermédiaires. Pour les deux types de correspondances, la relation r et fr réfèrent à *égal* dans notre approche.

Dans (Granitzer, et al., 2010) (Euzenat, 2007) (Yan, et al., 2011), les auteurs ont donné une introduction complète et la comparaison de différentes techniques et applications de base. Les approches basées sur les similarités sémantiques cherchent à découvrir la relation égalitaire entre ontologies. La relation hiérarchique, comme super-classe et la classe enfant, et les autres relations sont au-delà de la capacité des approches fondées sur la similarité. Dans cette section, nous nous concentrons sur la découverte de relation d'égalité entre les ontologies, les autres types de relations ne sont pas considérés.

Nous avons étudié des approches fondées sur les matchers multiples, pour voir comment les pondérations sont obtenues pour l'agrégation. RiMOM (Li, et al., 2009) a utilisé deux facteurs de similitude : le facteur d'étiquette de similarité et le facteur de structure de similarité, qui sont calculés à partir des concepts et des structures caractéristiques des ontologies sources, pour aider à définir le poids de différents comparateurs. UFOme (Pirró & Talia, 2010) a proposé deux coefficients d'affinité : le coefficient d'affinité lexicale L_a et le coefficient d'affinité structurelle S_a , qui permet également de conclure à partir des informations d'ontologies source. Le poids est calculé sur la base de deux coefficients d'affinité avec une fonction heuristique. PRIOR+ (Mao, et al., 2010) propose un terme « *harmony* » h pour estimer l'importance et la fiabilité des similitudes et les utiliser comme poids. Enfin, SFS (Huang, et al., 2007) a appliqué une approche de réseau de neurones artificiels pour apprendre le poids à partir des données d'entraînement.

4.4.4 Analytic Hierarchy Process (AHP)

AHP est une méthode pour organiser et analyser des décisions complexes avec un processus structuré. Il a été développé par Thomas L. Saaty (Saaty, 1990) basé sur les mathématiques et la psychologie. La méthode AHP équilibre différents facteurs par rapport à un but. Initialement, le but escompté, les critères et les alternatives sont définis. Ensuite, avec un procédé strictement défini, les alternatives sont comparées les unes aux autres au regard d'un critère et une intensité spécifique d'importance (*scale*) est affectée. Enfin, les résultats de chaque étape sont combinés et la priorité de chaque alternative est calculée. Habituellement, la priorité est utilisée pour déterminer une solution de rechange qui s'adapte le mieux à l'objectif. Dans notre approche, nous adaptons la priorité au poids des différents comparateurs. Plusieurs travaux ont permis de situer et mesurer l'efficacité de AHP. Notamment (Saaty & Vargas, 2001) ont analysé les inconvénients d'AHP et les conditions d'application. (Vaidya & Kumar, 2006) ont examiné certaines applications utilisant AHP dans différents domaines. (Mochol, et al., 2006) ont également adopté AHP pour l'alignement d'ontologies pour des approches de sélection, mais ils visent également à choisir des approches de comparaison ou des techniques correspondantes au niveau macro.

4.4.5 Alignement basé sur des Stratégies Multiples

Un matcher spécifique, peut travailler plus efficacement et obtenir des résultats plus précis sur certaines ontologies. Ceci indique que le matcher a des conditions de correspondance particulières pour obtenir le meilleur résultat. De même, pour les ontologies spécifiques, il est nécessaire de trouver un adaptateur approprié pour les faire correspondre. En effet, il n'y a pas de comparateurs parfaits pour une ontologie spécifique, et une ontologie peut être matchée par plusieurs matchers spécifiques. La question clé est de savoir comment combiner différents matchers pour les rendre complémentaires. Nous proposons d'utiliser les multi-stratégies pour gérer les différentes situations. Trois matchers retenus seront combinés : le point de vue de la chaîne de caractères, l'aspect sémantique et structurel de l'ontologie.

- Les « *String-Base Matchers* » (SBM) adoptent la distance Jaro-Winkler (Winkler, 1999) et la fonction de distance N-gramme avec une contrainte de longueur de label (étiquette).
- Les « *Matchers for Semantic Matching* » (MSM) utilisent un modèle basé sur la taxinomie de (Li, et al., 2009) avec WordNet (Pedersen, et al., 2004), et utilisent une solution spécifique pour résoudre le problème d'homonymie.
- Les « *Graph-Based Matcher* » (GBM) traitent l'ontologie comme un graphe orienté, en essayant de trouver le sous-graphe commun à certaines règles.

Avant la tâche d'appariement, les étapes d'atomisation (*tokenizing*) et d'identification des principaux termes sont réalisées comme un pré-traitement. La plupart des étiquettes des entités sont des mots composés plutôt qu'un seul mot significatif. La Tokenization aide à éliminer les informations inutiles qui pourraient brouiller la tâche de matching, et d'identifier le mot de base de l'entité, ce qui représente le sens principal de l'élément.

4.4.5.1 Vue d'ensemble de la Stratégie

Différentes stratégies sont appliquées pour les diverses situations d'appariement. La Figure 17 illustre la vue d'ensemble de notre stratégie de sélection. Une paire d'éléments d'une ontologie prétraitée est fournie en entrée, puis plusieurs conditions sont examinées pour décider de la stratégie à appliquer, à savoir quels matchers utiliser. Pour une stratégie, qui utilise plusieurs matchers, les résultats trouvés seront regroupés avec AHP présenté dans la section 4.4.4.

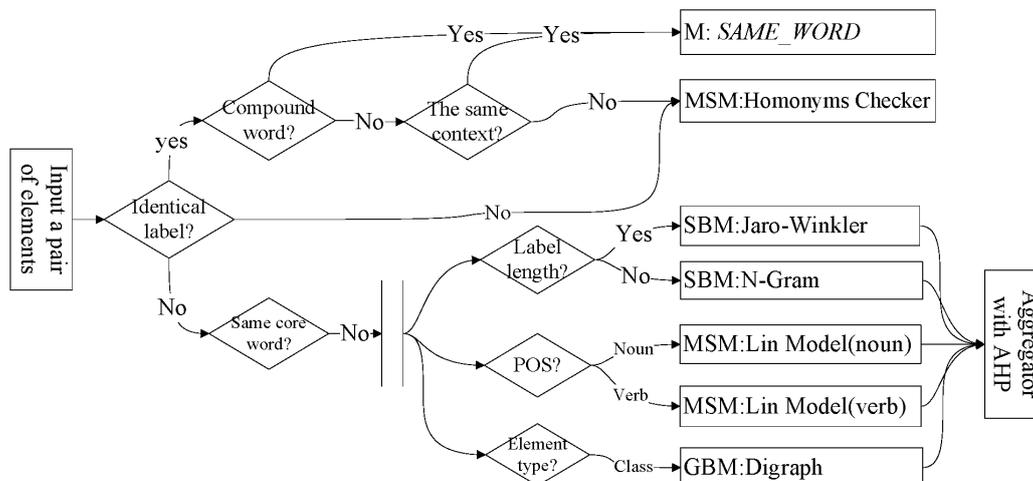


Figure 17. Flux Général de la Stratégie de Sélection

4.4.5.2 Atomisation (Tokenizing) et Identification de « Core Word »

On trouve dans les labels des ontologies principalement deux types de mot composé : les labels basés sur les noms, utilisés pour l'étiquetage des classes et des propriétés de noms, et les labels à base de verbes pour les noms de relation. Les principaux modes de composition ont été étudiés par de nombreuses ontologies du monde réel (ex. (Ceausu & Desprès, 2007) (Sari, et al., 2010)) et sont affichés dans la première colonne du Tableau 1, suivi d'un exemple. Pour identifier le mode qui est utilisé, le mot composé est atomisé par des règles : 1) un mot d'arrêt, par exemple, un tiret, un souligné, ou un point ; 2) un mot avec des lettres capitales, comme « numberOfTelephone ». Avec PosTagger (Toutanova, et al., 2003), la partie du discours (*Part Of Speech*, POS) de chaque mot distinct est étiqueté puis le mode est identifié. La colonne 3 indique quel mot est reconnu comme noyau, la plupart du temps le nom ou la racine du verbe conjugué, suivant l'exemple de texte de base reconnu dans la colonne 4.

Outre le mot de base, des informations complémentaires sont également notées, comme les noms multiples, la voix passive, etc. La représentation de ces informations est notée (mot de base, <type, complément d'info. 1, type complètement d'info. 2, ... >). Par exemple, (conduct, <form, pass>) représente le mot de base « *conduct* » avec une forme passive. Une forme de « Pattern » complexe peut être également utilisée (Maynard, et al., 2009) (Ritze, et al., 2008).

Tableau 1. Identification de « Core Word »

| | Composition mode | Example | Core word rule | Core word |
|------------|------------------|-----------------------|------------------|----------------|
| Noun-based | Single noun | book, books | The noun | book |
| | Multi-nouns | book_title, bookTitle | The last noun | title <book> |
| | Multi-nouns with | titleOfBook, | Noun before "of" | title |
| | Adjective-noun | editedBook | The noun | book |
| Verb-based | Single verb | Uses | verb stem | use |
| | Verb-noun | hasSiblingsOf | verb stem | have <sibling> |
| | Verb-preposition | applyWith, | verb stem | apply |
| | Passive form | conductedBy | verb stem | conduct < pas> |

4.4.5.3 String-Based Matchers (SBM)

Les comparateurs de chaînes de caractères sont conçus sur la base du label, qui représente les concepts, les propriétés ou annotations. Ces éléments sont traités seulement comme une séquence de lettres, sans tenir compte du sens représenté et de la structure contenue.

Jaro-Winkler Distance. La distance de Levenshtein (aussi connue comme la distance d'édition) est la fonction de distance la plus connue, dans laquelle la distance est le coût des opérations, y compris l'insertion, la suppression et la substitution, pour convertir s_1 vers s_2 dans une meilleure séquence. La distance de Jaro-Winkler (Winkler, 1999) est une mesure de

chaîne largement basée sur la distance de Jaro (Jaro, 1995). Des comparaisons ont été effectuées dans (Cohen, et al., 2003).

N-Gram. La distance de Jaro-Winkler a des limites lors de la correspondance entre les deux chaînes qui ont de grandes différences de longueur, comme « membre » et « conference_member ». Lorsque $\min(|s_1|, |s_2|) - 1 > \max(|s_1|, |s_2|) / 2$, SBM applique un n-gram (Brown, et al., 1992) en tant que technique de matching, et plus précisément, trigramme. Le trigramme (n,s) représente l'ensemble des trigrammes, où n est la longueur de la sous-chaîne s. La similitude entre les chaînes s_1 et s_2 avec la méthode n-gramme est :

$$TG(s_1, s_2) = \frac{|\text{trigram}(s_1) \cap \text{trigram}(s_2)|}{\min(|s_1|, |s_2|) - 2} \quad (3)$$

4.4.5.4 *Matchers for Semantic Matching (MSM)*

Tout d'abord, une approche fondée sur la taxonomie (Lin, 1998), appelée modèle de Lin, pour le matching de similitude de sémantique est appliquée dans MSM. Dans le modèle Lin, la taxonomie est prise comme un arbre, WordNet (Pedersen, et al., 2004) est utilisé comme la taxonomie. Elle renvoie à une similarité sémantique en mesurant la « communalité » entre deux mots dans l'arbre de taxonomie.

Le même mot ne représente pas toujours la même signification. L'homonymie est un cas particulier dans l'appariement sémantique. Il représente des significations différentes dans des contextes différents, comme « article » qui peut se référer à un document ou faire référence à un produit. D'abord, nous mesurons si les deux ontologies, où les homonymes sont produits, appartiennent au même contexte (selon un indicateur sémantique, voir rubrique suivante). Dans le cas contraire, l'équation (4) est appliquée pour le calcul de la similarité $H(s)$ d'une paire d'homonymes. Dans l'équation, #m (meaning, signification) est le nombre de différentes explications (extraites de WordNet) que le mot possède.

$$H(s) = \frac{\#m - 1}{\#m} \quad (4)$$

4.4.5.5 *Graph-Based Matcher (GBM)*

Le graphe orienté (ou digraph) est représenté en tant que $G = \langle V, E \rangle$, V est un ensemble de sommets (ou nœuds), E est un ensemble de bords de couples de sommets (v_i, v_j) à partir d'un sommet en V . Un vertex d'ontologie est représentée par (#indegree, #outdegree, #subclass), la similitude entre deux sommets est définie comme étant :

$$GBM(v_1, v_2) = \frac{1}{3} (inR + outR + subR) \quad (5)$$

Où inR , $outR$ and $subR$ dénotent le ratio entre #indegree, #outdegree, #subclass de deux sommets v_1 et v_2 de O_1 et O_2 .

4.4.6 *Agrégation Dynamique avec AHP*

Nous appliquons AHP pour apprendre le poids de chaque matcher. Les trois premiers indicateurs de similarité sont proposés à partir de différents aspects de l'ontologie source, ce

qui devrait refléter les caractéristiques essentielles de l'ontologie source. Ensuite, en fonction de ces indicateurs, l'intensité d'importance est décidée par des règles spécifiques.

4.4.6.1 Indicateurs de Similarité

Afin de décider lequel des matchers appliquer et de l'importance de chaque matcher, nous utilisons trois indicateurs de similarité qui aideront la prise de décision. Ces indicateurs sont tirés des ontologies sources, et ils peuvent refléter les caractéristiques essentielles d'ontologies source d'un aspect spécifique.

Indicateur de chaîne. L'indicateur f_{stg} reflète la similarité entre deux labels d'ontologies. Avant la comparaison, les mots d'arrêt (stop words) dans les labels sont supprimés, il est défini comme :

$$f_{stg} = \frac{\#ic + \#ip}{\min(\#tcp_1, \#tcp_2)} \quad (6)$$

Où $\#ic$ et $\#ip$ désignent le nombre de classes et propriétés identifiés avec des labels identiques, $\#tcp$ désigne le nombre total de classes et propriétés d'une ontologie.

Indicateur structurel. L'indicateur f_{str} désigne le nombre de nœuds avec une structure semblable en étudiant les sous-classes (hiérarchie) et les relations (dépendance). Initialement l'ontologie est traitée comme un graphe orienté, puis il est défini comme :

$$f_{str} = \frac{\#common_ds}{\min(\#niv_1, \#niv_2)} \quad (7)$$

Où $\#common_ds$ désigne le nombre de sommets qui ont le même $\#indegree$, $\#outdegree$, et $\#subclass$. $\#niv$ désigne le nombre de sommets non isolés.

Indicateur sémantique. L'indicateur Sémantique f_{sem} est calculé sur la base des mots clés identifiés, pas les labels originaux. Pour un mot dans l'ontologie O_1 , s'il existe un synonyme dans O_2 , alors $\#synonym$ est incrémenté de 1. Il est défini par :

$$f_{sem} = \frac{\#synonym}{\min(tcp_1, tcp_2)} \quad (8)$$

Où $\#synonym$ est le nombre de synonymes identifiés entre O_1 et O_2 . Cet indicateur est également considéré comme un indicateur pour vérifier si deux ontologies appartiennent au même contexte, pour valider la question d'homonymie.

4.4.6.2 Calcul de pondération avec AHP

Nous suivons le processus AHP. Dans la première étape, le but, les critères et les alternatives sont définis dans le Tableau 2. Plus précisément, l'objectif est de déterminer un matcher approprié en respectant trois aspects de la capacité de matching. Outre les trois critères, nous supposons que les autres critères sont égaux, par exemple, la précision, la performance. Les alternatives sont les différentes stratégies d'adaptation définies dans la section précédente.

Tableau 2. *Description de But, Critères et Alternatives pour AHP*

| Level | Description |
|-------------|---|
| Goal | Determine a suitable matcher for ontologies to be matched |
| Criteria | The Ability to solve string aspects Matching (AM-stg) |
| | The Ability to solve structure aspects Matching (AM-str) |
| | The Ability to solve semantic aspects Matching (AM-sem) |
| Alternative | Matcher SBM, Matcher MSM, Matcher GBM |

Nous pensons que si les deux ontologies ont une grande similitude dans un aspect (chaîne, structurale ou sémantique), dans ce cas, le matcher, qui est basé sur cet aspect, est plus important que les autres dans la découverte des correspondances. Pour affecter l'intensité d'une importance automatiquement, les indicateurs de similarité sont utilisés avec une importance provenant directement d'une règle. Si le matcher est dans la même catégorie avec une possibilité de correspondance, un rapport de base supplémentaire br sera ajouté sur l'indicateur, sinon, nous utilisons la valeur de l'indicateur directement. br est calculé automatiquement à partir des indicateurs et défini comme :

$$br_x = \left| \frac{1}{3} \sum f_x - f_x \right| \quad (9)$$

Où f_x représente l'une des trois valeurs des indicateurs, et br_x désigne le rapport de base pour chacun. Par exemple, $f_{stg}=0,3$, $f_{str} = 0,2$, $FSEM = 0,7$, alors $br_{stg}=0,1$, $br_{str}=0,4$ et $br_{sem}=0,1$. D'abord, nous évaluons les critères suivants : la capacité de résoudre les aspects matching de chaîne de caractères (AM-stg), les matchers comparent à tous les autres et affectent le balance *scale* dans le Tableau 3. Le résultat est transféré dans une matrice de calcul de priorité dans le Tableau 4.

Tableau 3. *Echantillon dérivant les priorités au regard de la capacité à résoudre les aspects matching de chaîne (AM-stg)*

| Alter. | Scale | Alter. | Scale |
|--------|-------------------|--------|----------------|
| SBM | $0.4(br+f_{stg})$ | GBM | $0.2(f_{str})$ |
| SBM | $0.4(br+f_{stg})$ | MSM | $0.7(f_{sem})$ |
| GBM | $0.2(f_{str})$ | MSM | $0.7(f_{sem})$ |

Tableau 4. *Transfert à la matrice et calcul de la priorité de chaque matcher en respectant AM-stg*

| AM-stg | SBM | MSM | GBM | Prio. |
|--------|-----|-----|-----|-------|
| SBM | 1 | 4/7 | 4/2 | 0.308 |
| MSM | 7/4 | 1 | 7/2 | 0.538 |
| GBM | 2/4 | 2/7 | 1 | 0.154 |

En utilisant le même procédé, deux autres critères (AM-str et AM-sem) pourraient être évalués. Nous avons d'ailleurs statué qu'ils sont également importants. Dans AHP, la prochaine étape consiste donc à comparer l'importance entre ces critères. Le rapport entre les critères pourra être ajusté en fonction de l'expérience. Un processus final qui regroupe l'ensemble de ces données sera réalisé. Il donne la priorité de chaque matcher, la priorité de chaque solution de rechange est considérée comme le poids du matcher. Ces étapes ne sont pas détaillées dans le présent document, le processus AHP sera suivi comme dans l'introduction donnée dans (Saaty, 1990) et l'application (Vaidya & Kumar, 2006).

Dans l'étape finale, la priorité de chaque matcher est obtenue et assignée en tant que poids ; par conséquent, la dernière valeur de similarité f_v est générée par

$$f_v = \sum v_x * w_x \quad (10)$$

Où v_x est la confiance intermédiaire obtenue par chaque matcher, et w_x est le poids généré avec la méthode introduite dans cette section.

4.4.7 Evaluation

Pour tester et valider l'approche proposée, un prototype de logiciel a été développé en Java. Il utilise WordNet (Pedersen, et al., 2004) comme base de données lexicale pour le contrôle des synonymes et des homonymes, PosTagger (Toutanova, et al., 2003) pour identifier les mots clés « *core words* ». Les API Java utilisés dans la mise en œuvre sont JWI (CSAIL-MIT, 2012), JWS (Hope, 2012) et l'API d'alignement (INRIA, 2012).

L'ensemble des données de l'expérience provient de la référence OAEI (OAEI, 2011) (Euzenat, et al., 2011). L'ensemble de données **biblio** a été utilisé depuis 2004 et l'ontologie semence « *seed* » concerne des références bibliographiques, qui contient 33 classes nommées, 24 propriétés d'objets, 40 propriétés de données, 56 personnes nommées et 20 individus anonymes. L'ensemble de données, contient trois groupes et totalise 110 ontologies de test comme énumérés dans le Tableau 5. Les ontologies dans les cas de tests systématiques sont construites autour de l'ontologie semence et de différentes variations.

Tableau 5. *Benchmark Ensemble de Données biblio*

| Test case | Data set | No. of ontologies | Description |
|-----------|-------------|-------------------|-----------------|
| 1xx | #101 - #104 | 4 | Simple ontology |
| 2xx | #201 - #266 | 103 | Systematic test |
| 3xx | #301 - #304 | 4 | Real ontology |

Trois mesures (Euzenat, 2007) sont utilisées pour évaluer : précision (P), rappel (R) et F1-measure ($F1$). La précision indique la possibilité de découvrir des alignements *corrects*, et le rappel indique la possibilité de découvrir *tous les* alignements. F1-measure combine et équilibre entre la précision et le rappel. L'ensemble des alignements identifiés par notre approche (dmsOA) est désigné par A_d , et l'ensemble des alignements de référence est noté A_r . Ensuite, les mesures sont appelées par :

$$P = \frac{|A_d \cap A_r|}{|A_d|}, \quad R = \frac{|A_d \cap A_r|}{|A_r|}, \quad F1 = \frac{2 \times P \times R}{P + R} \quad (11)$$

La Figure 18 illustre les résultats d’exploitation, dans lesquels l’axe des abscisses représente le seuil de similitude et l’axe des ordonnées représente les trois mesures, les détails de données sont répertoriés sous le graphique suivant. Le graphique permet de constater que la précision reste stable et très élevée autour de 0,95. Lorsque le seuil augmente, le rappel décroît lentement de 0,92 à 0,59, par conséquent F1-mesure diminue de 0,92 à 0,73. La précision moyenne est de 0,94, le rappel moyen est de 0,69 et la mesure de F1 moyenne est de 0,80.

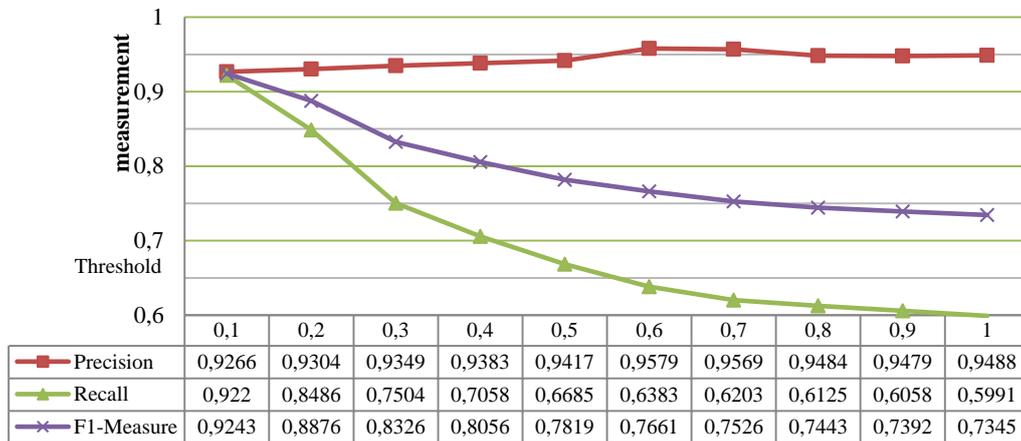


Figure 18. Précision, Rappel et F1-Mesure de dmsOA

Nous comparons le test F1-mesure avec les autres approches dans la Figure 19, les données proviennent de la campagne OAEI 2011 (OAEI, 2011). Il y avait 15 participants, dont deux, AgrMaker et MapSSS, n’avaient pas de résultats dans ce benchmark. La dernière colonne dmsOA (0,80) présente le résultat obtenu par notre approche. Il se classe troisième, supérieur à 11 (sur 13) des approches. Il reste cependant légèrement inférieur à CSA (0,83) (Tran, et al., 2011) et YAM++ (0,86) (Ngo, et al., 2011) de 0,03 et 0,06 respectivement. Ces deux seules méthodes plus performantes, ayant aussi adoptées plusieurs matchers et l’agrégation dynamique, tendent à conforter l’intérêt de notre approche. Ces résultats ont été publiés dans [R4] et [R5].

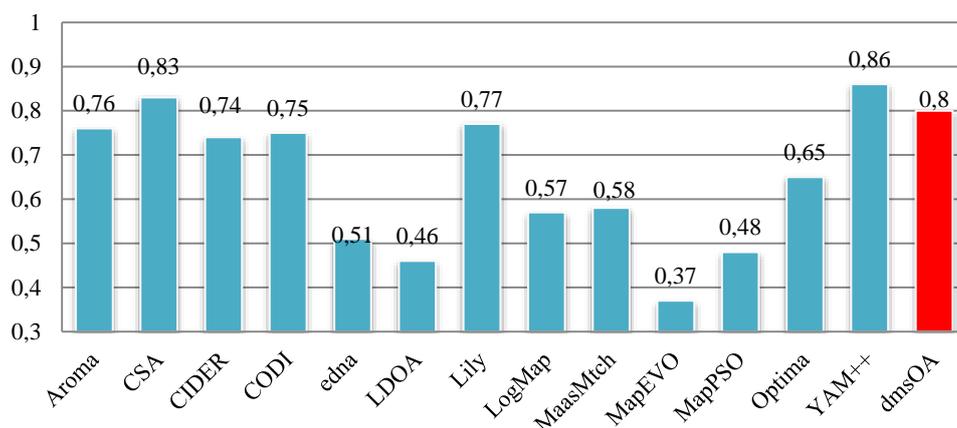


Figure 19. Comparaison de F1-Mesure avec Différentes Approches

Nous avons implémenté à partir de ces travaux un outil java qui peut être alimenté par l’extracteur d’ontologie depuis les BD relationnelles : RDBtoOnto (Cerbah, 2010) ou directement à partir d’ontologies depuis (protégé, 2010). Ce travail a été publié dans [R4].

4.4.8 Conclusion

Cette section a présenté les travaux effectués dans le cadre de la thèse de Fuqi Song [T2]. Cette nouvelle approche combine une stratégie de multi-matching regroupés et ordonnés par AHP. Chaque matcher couvrant une vue différente des ontologies. Un point fort de cette approche réside dans la découverte des mots clés avec le « *tagging* » POS en prétraitement, ce qui a amélioré la capacité de l'appariement sémantique. L'application de AHP permet, par le calcul de pondérations ajustables, l'agrégation dynamique et automatique, pour s'adapter à des ontologies de sources et domaines d'application divers. L'expérimentation a testé un cas en référence aux données OAIE. L'approche atteint un bon niveau de précision et reste stable, elle surpasse 11 sur 13 des autres méthodes évaluées. Les seules méthodes plus performantes ayant aussi adopté plusieurs matchers et l'agrégation dynamique conforte la pertinence de l'approche à stratégies multiples proposée dans nos travaux. Un outil connecté aux éditeurs d'ontologies a été implémenté. Ceci s'intègre dans l'idée de l'EI fédérée en s'appliquant à résoudre dynamiquement les problèmes d'appariement sans concertation préalable. Nous considérons cet apport comme une réponse automatisant la compréhension mutuelle à mettre en place lors du dialogue à base d'ontologies éphémères de la plateforme 4.2.4.

Ce travail pourrait certainement être encore étendu. Plusieurs pistes de recherche pourront être considérées. Actuellement, les règles définies dans ce travail sont limitées au cas général et peuvent être moins efficaces dans les domaines particuliers. Afin de s'adapter à un domaine de connaissances spécifique, une recherche future pourrait consister à étendre les règles pour la reconnaissance des mots clés, en distinguant des règles générales et des règles spécifiques. Le comparateur PCW et le comparateur lexical effectuent des tâches d'alignement qui reposent principalement sur les labels des entités, si les commentaires et les annotations supplémentaires de l'entité étaient également pris en compte en tant que sources sémantiques, les résultats pourraient être améliorés. Afin d'appliquer la méthode AHP de pondération proposée dans d'autres domaines, la méthode de calcul des indicateurs de similarité pourrait être adaptée à chaque domaine spécifique. De nouvelles règles relatives au niveau de l'instance pourraient être proposées pour extraire les données dans les bases relationnelles vers des instances d'ontologies afin d'enrichir la sémantique des données.

Compte tenu des besoins d'interopérabilité sémantique accrus au niveau conceptuel dans les entreprises énoncés dans (FUTURPROD, 2013), un travail d'application et d'extension des résultats conceptuels de cette thèse est en cours. Nous proposons notamment d'appliquer l'alignement d'ontologies pour le développement de l'interopérabilité entre le Model-Driven Architecture (MDA) et les modèles de simulation. Le matching entre modèles conceptuels et simulation pourra se faire sur la base de l'alignement d'ontologies. La méthodologie générale proposée est présentée dans la section perspective 5.3 de ce document.

4.4.9 Résultats

La thèse de Fuqi Song [T2], co-encadrée à 50% avec David Chen (Sept 2010 – Nov 2013), a permis d'améliorer l'alignement d'ontologies et les approches d'agrégation par « matcher ». La performance a été améliorée à deux niveaux : (i) Trouver des correspondances appropriées, et (ii) Meilleure précision des résultats de l'alignement.

A cet égard, le travail effectué sur cette thématique a été publié dans **2 revues [R4] [R5] avec IF, 1 chapitre d'ouvrage [O1]** et plusieurs conférences. A l'issue de sa thèse Fuqi Song a obtenu le **Prix « Chinese Government Award for Outstanding Students Abroad »** d'une valeur de 6000\$ et a été qualifié en section 27 et 61. Il est actuellement en **Post Doc à l'INRIA de Sofia Antipolis**.

4.5 *Simulation de Workflow de Processus*

4.5.1 *Introduction*

Les SIs des entreprises sont de plus en plus amenées à communiquer avec leur environnement physique. Les perspectives FINES (FINES, 2012) définissent une « *sensing enterprise* » comme capable de communiquer avec des objets et son environnement physique. L'approche service permet de connecter par des services informatiques le SI à son environnement réel ou simulé. Ceci nécessite cependant une orchestration du processus afin de définir une séquence de communication. Cette section présente les résultats techniques des travaux d'orchestration et de simulation d'un processus de gestion de véhicules de transport. Le chargement et la tournée de livraison ont été modélisés et simulés dans le cadre du PostDoc financé par la région Aquitaine effectué par Judicaël Ribault [P1]. Ce travail répond, dans un premier temps, à l'objectif de simulation du projet ANR (PRODIGE, 2009) (routage de produits intelligents) dirigé par Jean Christophe Deschamps MCF à l'IMS. Dans un deuxième temps, ces travaux s'intègrent dans notre contribution visant à faciliter la connexion des SI, tels que souhaités dans l'EI fédérée, et requis dans notre plateforme présentée en 4.2.4.

Dans ce travail, la simulation doit permettre de valider des scénarios d'utilisation permettant de tester des fonctionnalités du logiciel atteignables uniquement après une succession de sollicitations de la plateforme, en provoquant des changements d'état de l'environnement et du système. Ensuite la simulation permet d'exécuter une démonstration des possibilités de la plateforme sans solliciter les systèmes sociotechniques auxquels elle est connectée. Elle permet ainsi de mimer les utilisateurs humains du système ainsi que les dispositifs technologiques qu'ils utilisent pour accéder à la plateforme (système) PRODIGE. Elle permet donc de simuler le comportement d'une flotte de véhicules en tournée [C6] [R1].

La section suivante présente le projet PRODIGE tandis que la section 4.5.7 décrit les scénarios auquel le projet a dû répondre. La section 4.5.4 présente la plateforme (ou système) PRODIGE. La section 4.5.7 présente la contribution du post-doctorat de Judicaël Ribault [P1] au projet PRODIGE à travers la mise en place d'une plateforme de simulation permettant de répondre à une partie des scénarios évoqués dans la section 4.5.3.

4.5.2 *Contexte Projet PRODIGE*

L'émergence des produits intelligents en production (Grabot & Collectif, 2012) et dans la chaîne de transport permet de mutualiser et de piloter l'externalisation du transport (Cruijssen, et al., 2007). Le recours à des transporteurs extérieurs a permis aux entreprises industrielles de réduire leurs coûts de revient de transport unitaires. L'intelligence du produit, technologie clés en transport pour 2015 (DGE, 2011), permet aux entreprises de transport de pousser la mutualisation en s'appuyant sur les ressources du transporteur mais aussi sur les acteurs non-transporteurs. L'objectif est de redéfinir le routage des produits pour réduire les coûts et de l'empreinte carbone comme préconisés par les prospectives Européennes de (H2020, 2014).

La solution PRODIGE s'appuie sur le concept de mutualisation horizontale au sein du réseau logistique. Dans la solution PRODIGE, le changement de la ressource transport dans le cadre d'un transbordement programmé par le produit intelligent s'appuiera sur une véritable démarche « coopérative » mettant en présence : transporteurs, expéditeurs et destinataires. La solution Prodige doit représenter une réponse cohérente aux freins de la mutualisation horizontale. Notre contribution, financée par la Région Aquitaine dans le cadre d'un Post doctorat est de permettre l'interopérabilité du SI et d'intégrer une composante simulation.

4.5.3 Scénarios

Nous avons ciblé l'analyse qui suit au sein du projet PRODIGE. Nous identifions des fonctions et scénarios particulièrement impactés par la notion de produit intelligent. Ces produits génèrent des événements liés à l'exécution des processus de transport et chargement/déchargement. Les événements sont classés en trois types. Tout d'abord, les événements liés aux produits (conformité, intégrité, vol). Puis, les événements liés aux ressources (véhicule et chauffeur) qui intègrent les pannes, accidents, états de santé du conducteur. Enfin, les événements liés à l'environnement (congestion, déviation, intempérie, changement d'heure, de lieu de livraison, apparition d'une nouvelle demande, annulation d'une commande). Nous avons présenté ces scénarios en conférence invitée [I2].

En fonction des événements et de leur occurrence durant les processus de chargement, transit ou déchargement, la solution PRODIGE propose des actions à mettre en place. Ainsi, les activités relevant de la production et du stockage, au sein des entreprises et entrepôts ne sont pas étudiées si bien que les produits intelligents de niveau NI₀ et NI₁ (code référençant chaque palette et permettant l'accès à des informations complémentaires dans une base de données – Intelligence de Niveau NI₁) ne sont pas abordés dans le cadre du projet.

Les opérations de chargement/déchargement ainsi que les produits intelligents de niveau NI₂ (palettes) sont vus sous l'angle informationnel. Nous partons de l'hypothèse que cette base de données à laquelle accède la palette, via les informations portées par le tag RFID permet d'identifier l'ensemble des informations sur les cartons et produits qu'ils contiennent. La solution PRODIGE doit permettre d'identifier rapidement les événements tels que la soustraction ou la non-conformité d'un chargement/déchargement. Elle permet en effet lors de mouvement de charge de vérifier les références des palettes entrantes ou sortantes de la remorque (conformité). Une autre fonction doit permettre d'identifier la destination initiale en cas d'erreur de palette : le code référençant la palette permet de retrouver toute information logistique utile à l'acheminement du produit. Enfin il doit être possible d'identifier et de localiser une palette conforme dans la zone de chargement : cette fonction appliquée au contexte de la préparation du chargement (dans l'entrepôt) n'est pas abordée en tant que telle. Le tag de la palette permet cependant en cas de déploiement de la solution PRODIGE avec de multiples antennes de localiser la charge dans la remorque (produit intelligent de niveau NI₃).

Lors du transit, les produits intelligents de niveau NI₃ sont au cœur de la problématique étudiée. Ainsi, les fonctionnalités de ces produits (remorque instrumentée par un boîtier de lecture RFID, associée à une solution informatique embarquée dans le tracteur – déport de l'intelligence) permettent de couvrir différentes fonctions. Notamment, détecter en temps réel les événements liés aux ressources (tracteurs) et à l'environnement. La solution PRODIGE prévoit une géolocalisation du véhicule permettant d'observer les dérives liées à une congestion, une panne, et donc une transmission de ces données si nécessaire.

Lorsque l'ensemble des contraintes associées aux produits transportés ne peuvent plus être respectées, une reconfiguration de tournée peut conduire à un transbordement de marchandises d'un véhicule à un autre. Dans un tel cas, les fonctionnalités inhérentes au produit intelligent doivent permettre plusieurs impératifs. Tout d'abord, changer de destinataire via une plateforme proche : la reconfiguration de tournée peut amener à un transbordement de véhicule et donc nécessiter d'introduire dans une tournée une nouvelle destination. Il peut également réallouer une charge à une autre ressource : la reconfiguration conduisant à un transbordement revient à allouer une charge à un autre véhicule après passage à un point de transfert. Si aucune possibilité de transbordement ou de réallocation de ressource n'est possible sans violation des contraintes de service (ex. fenêtre de temps, de

capacité), la livraison des palettes est reportée ou annulée. Enfin, le trajet doit pouvoir être recalculé pour rester optimal (Re-routage) : ce calcul est au cœur de la solution PRODIGE. En situation de non-respect de certaines contraintes, une reconfiguration du routage est prévue au périmètre de chaque unité d'expédition transportée. L'intelligence embarquée dans le camion lui permettra de dialoguer avec d'autres véhicules, et de rechercher une nouvelle solution satisfaisant les contraintes ou tout au moins de trouver une solution dégradant le moins possible la solution initiale de routage, ceci en fonction de la situation réelle observée.

Dans ce contexte, cinq familles de scenarios ont été identifiées, décrivant l'intérêt et l'impact de l'usage du produit intelligent en transport. Nous avons été impliqués dans le scenario qui n'a pas recours aux dispositifs physiques type RFID, portail lecteur. Il a eu pour objectif de tester par simulation la solution PRODIGE de routage de produits intelligents. Ce scénario a permis de tester les solutions intégrées de routage des produits intelligents en intégrant le transbordement et la mutualisation des ressources du réseau logistique.

4.5.4 Système PRODIGE

Le système PRODIGE est une application web exposant un ensemble de fonctions exécutables via service web afin de favoriser l'interopérabilité (définir une tournée, visualiser les résultats, etc.). Les services web permettent également l'intégration d'applications ou de données provenant de sources hétérogènes (i.e. Mash-up).

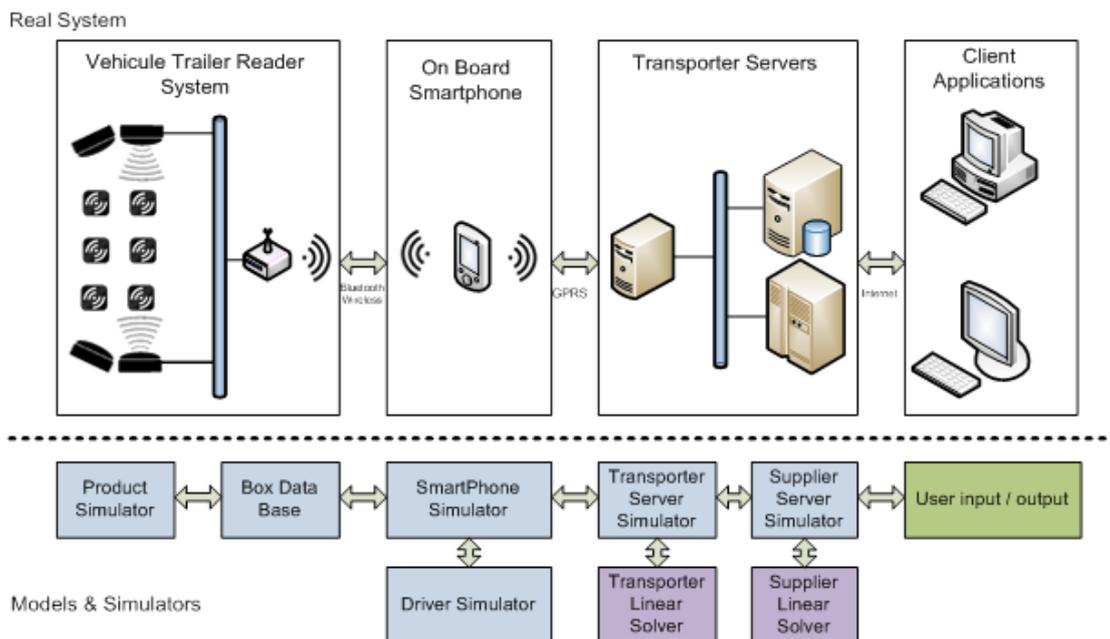


Figure 20. Modèles Blocs de la Chaîne Logistique PRODIGE

L'objectif est de formaliser les séquences d'appels aux services web proposés par le système PRODIGE. Ces appels sont enchainés dans des scénarios d'utilisation du système PRODIGE, ce qui revient à spécifier un ensemble de Workflow de service. La Figure 20 présente les blocs de fonctionnalités qui sont modélisés. Les modèles de comportements des différents acteurs ont été spécifiés dans un format de modèles à événements discrets (G-DEVS [C8]). Ces modèles de niveau NI₂ ont été présentés dans plusieurs conférences, notamment en tant que conférencier invité [I2], et également dans une revue [R7].

Certaines parties du système physique peuvent être modélisées par des modèles à événements discrets et simulées, par exemple, le comportement des véhicules, les étiquettes

RFID, Workflow. Néanmoins, d'autres parties du système (par exemple, le logiciel d'ERP, de planification de la production, les algorithmes de routage de véhicule géolocalisés) sont généralement des composants logiciels développés avec des langages propriétaires. Ils sont considérés comme des boîtes noires difficiles à capturer avec des modèles. Pour surmonter ce problème, il est proposé d'interconnecter dans la plateforme les composants de simulation à événements discrets avec les autres composants hétérogènes (ex. programmation linéaire) où l'interopérabilité syntaxique et temporelle aura besoin d'opérer entre ces composants.

Les concepts DEVS (*Discrete Event Specification*), G-DEVS (*Generalized DEVS*) [C8] et HLA (*High Level Architecture*) seront utiles afin de formaliser les modèles comportementaux des composants émulés et permettront d'établir l'interopérabilité au niveau de l'exécution.

4.5.4.1 Formalisation du Processus en utilisant le formalisme DEVS ou G-DEVS

Différents formalismes sont en concurrence pour représenter les systèmes complexes avec une modélisation à événements discrets : diagrammes d'états, réseaux de Petri et DEVS (Zeigler, 1976), etc. Parmi ceux-ci, ce dernier est préféré pour plusieurs raisons. Il permet de modéliser des systèmes complexes avec un niveau de précision ajustable. En outre, il intègre intrinsèquement le temps, manipule conjointement les concepts d'état et d'événement et fournit une sémantique opérationnelle claire et indépendante des modèles. En conséquence, il constitue une solution appropriée. Des travaux de recherche existent déjà sur la transformation de modèles de Workflow [R12], « *supply chain* » [R11] ou logistiques en modèles de simulation DEVS. Les aspects d'interopérabilité entre modèles DEVS et d'autres composants logiciels sont traités depuis quelques années, en particulier par HLA [R8].

4.5.4.1.1 Concepts du Formalisme DEVS

B.P. Zeigler a défini en 1973 une spécification formelle des systèmes réels avec des événements discrets nommé DEVS (Zeigler, 1976) (*Discrete Event System Specification*). DEVS est défini comme un formalisme universel abstrait qui est indépendant de la mise en œuvre. Un modèle DEVS atomique est un bloc avec des ports d'entrée et de sortie pour échanger des événements discrets. Le comportement du modèle est décrit par les états liés par des transitions. La transition est déclenchée par la réception d'un événement discret, ce qui provoque le changement de l'état actuel vers un état futur. En plus des techniques classiques de modélisation d'événements discrets, DEVS présente la possibilité d'une évolution autonome du modèle à travers le temps. L'extinction de la durée de vie de l'état actuel, déclenche une fonction interne de transition d'état. Les entrées du monde réel, les signaux de sortie et les états sont abstraits par des valeurs constantes par morceaux où les seuils sont considérés comme des événements discrets.

Le concept de modèles couplés est introduit par (Ören, 1971). Ce concept a été repris par B.P. Zeigler pour DEVS et est présenté dans (Zeigler, et al., 2000), il fournit un moyen de construire de nouveaux modèles couplés faits par la réutilisation et le raccordement modèles stockés. Le simulateur DEVS est explicitement spécifié dans le formalisme et permet d'obtenir le développement de simulateur sans ambiguïté.

4.5.4.1.2 Modélisation et Simulation G-DEVS

G-DEVS (*Generalized DEVS*) a été proposé par N. Giambiasi (Giambiasi, et al., 2000) [C8] pour palier l'inconvénient le plus classique des modèles à événements discrets (par exemple DEVS). Ils approximent, les signaux d'entrée-sortie observés/générés par des

trajectoires constantes par morceaux. G-DEVS définit une abstraction d'informations par des trajectoires polynomiales par morceaux [C8]. Ainsi, G-DEVS définit l'« événement coefficients » comme une liste de valeurs représentant de façon plus précise une trajectoire d'entrée-sortie. Par conséquent, un modèle DEVS, du point de vue conceptuel, peut être considéré comme un G-DEVS d'ordre zéro.

G-DEVS reprend le concept du modèle couplé introduit dans DEVS (Zeigler, et al., 2000). Chaque modèle de base d'un modèle couplé interagit avec les autres pour produire un comportement global. Les modèles de base sont des modèles atomiques ou couplés qui sont déjà stockés en bibliothèque. Le couplage de modèles se fait avec une approche hiérarchique (en raison de la fermeture en couplage de G-DEVS, les modèles peuvent être définis d'une manière hiérarchique).

Du côté de la simulation, les modèles G-DEVS emploient le simulateur abstrait DEVS (Zeigler, et al., 2000) qui définit la sémantique de simulation du formalisme. L'architecture du simulateur est dérivée de la structure du modèle hiérarchique. Les processeurs impliqués dans une simulation hiérarchique sont des simulateurs qui animent le comportement dynamique des modèles atomiques. Les coordinateurs permettent l'acheminement des messages entre les modèles couplés. Le coordinateur racine assure la gestion globale de la simulation. La simulation fonctionne en envoyant des messages entre les coordinateurs et les simulateurs. La simulation d'un modèle G-DEVS transporte donc des événements avec une liste de valeurs de coefficient à la place d'une valeur unique dans DEVS.

La plateforme PRODIGE est destinée à gérer les traitements de données relatives à des séquences d'action qui seront exécutées par des ressources logicielles et leur synchronisation. La séquence d'actions sur les données est structurée par la définition d'un modèle Workflow (WfMC, 1999). La synchronisation est abordée par les algorithmes de synchronisation de simulation distribuée développés par [R13] [C19] [C20] adaptés de l'algorithme conservateur d'origine de Chandy-Misra rappelé dans (Fujimoto, 2000). Les modèles G-DEVS proposés de Workflow sont mis en œuvre et simulés avec le RTI HLA poRTIco (PoRTIco, 2012).

4.5.4.2 Système de Composants Interopérables

La plateforme proposée pour la simulation (Figure 21) considère différents composants logiciels impliqués dans le processus logistique en tant que « fédérés » HLA. Chaque composant est une partie des SI des acteurs impliqués dans la chaîne logistique. Les partenaires sont des transporteurs, des fournisseurs, des clients, ou des solutions techniques et technologiques intégrées dans les ressources de transport (véhicules) pour soutenir la géolocalisation et la traçabilité permanente des marchandises. Comme indiqué précédemment, le système complet n'a pas été intégralement modélisé en G-DEVS. Certaines parties sont déjà mises au point et sont des composants prêts à être utilisés et reliés à la plateforme. L'outil pour planifier la prestation a été développé en utilisant l'algèbre linéaire par (François, et al., 2005). L'algorithme de routage pour le système de guidage de véhicule est une solution commerciale (SYGIC, 2014). Les deux sont considérés comme des boîtes noires avec uniquement des interfaces d'entrée-sortie à connecter.

L'utilisation de la norme HLA soutient la nature distribuée et hétérogène du processus de prise de décision effectué le long de la chaîne d'approvisionnement par l'intégration de composants dans des entités fédérées. La communication de fédérés distants est donc relayée par le RTI qui assure l'interopérabilité entre les applications utilisées dans le processus. HLA facilite également la connexion d'autres applications à la plateforme à l'avenir. L'architecture de la plateforme proposée intègre des concepts issus de l'interopérabilité fédérée (Figure 4)

afin de créer une interface souple entre les composants sans intégration et / ou recodage des applications locales. Nous distinguons, dans la Figure 21, cinq classes de composants à impliquer et interconnecter : les composants de simulation, le SIG, le Workflow le solveur linéaire et les bases de données. Nous présentons ci-après les éléments au cœur de notre étude.

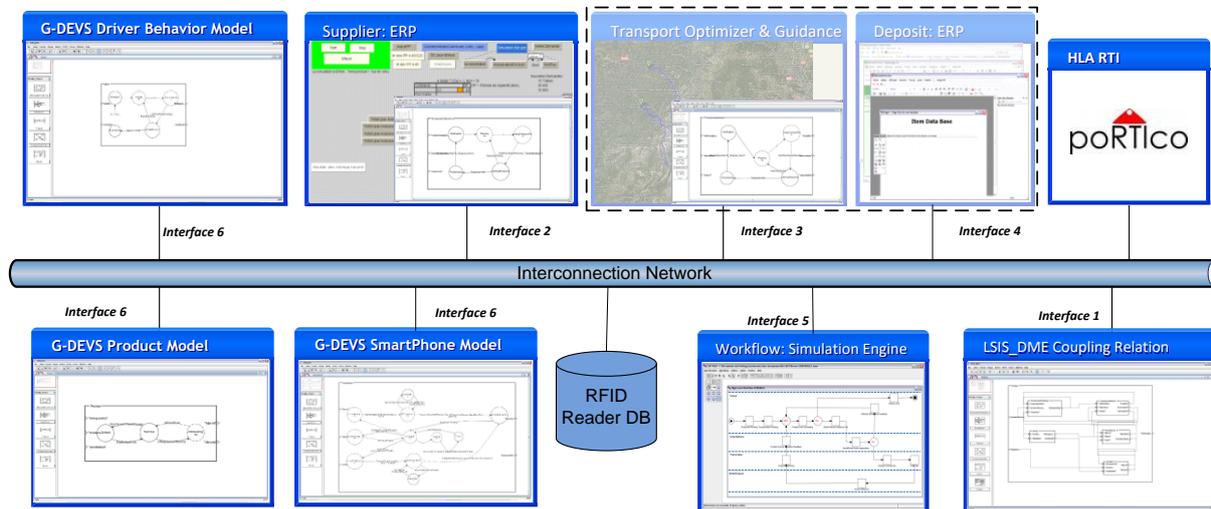


Figure 21. Plateforme de Simulation/Exécution pour supporter le projet PRODIGE

4.5.4.3 Composants Workflow

Le concept de Workflow a initialement été conçu pour formaliser, automatiser et améliorer les procédures d'entreprise (WfMC, 2005). Le Workflow peut être différencié d'un processus tant il est centré sur les informations et la mise en œuvre d'un SI. Un Workflow, dédié à la production, est un ensemble d'étapes et d'enchaînements logiques d'appels de logiciels pour traiter les informations accompagnant l'élaboration d'un produit jusqu'à son arrivée sur le marché (Weske, 2007). Les étapes d'un Workflow sont basées sur l'observation d'un certain nombre d'étapes qui sont originellement enchaînées manuellement. Les Workflows peuvent être utiles pour l'expérimentation informatique en assurant l'orchestration, la répétabilité (« rejouabilité » en simulation), la synchronisation et l'interopérabilité. J'ai consacré mon sujet de thèse [T3] à l'implémentation d'un Workflow G-DEVS simulable.

Le Workflow PRODIGE décrit le flux d'informations (la séquence d'échange) entre les traitements (les tâches) qui doivent être effectués par des ressources logicielles. Ce flux de données entre les partenaires logistiques, les produits et le client passe à travers les produits équipés de tags RFID, les lecteurs RFID et les smartphones. Ce flux doit être orchestré par un volet technique capable de gérer le routage, le séquençage et l'agrégation des informations. Le composant d'orchestration technique contient un moteur de Workflow, qui dicte la bonne séquence d'échange d'informations selon un modèle de flux de travail (*Simulation Engine* Figure 21), et un HLA RTI qui soutient la causalité par synchronisation temporelle (*RTI poRTIco* Figure 21).

Le WfMC a proposé d'utiliser le langage XML (*eXtended Markup Language*) pour la représentation des Workflows, il est actuellement accepté comme une norme dans la communauté de Workflow (WfMC, 2005). Le Workflow XML structure le modèle de processus et peut être validé en se référant à la Workflow DTD de la WfMC (*Document Type*

Definition). Néanmoins, cette DTD XML n'est pas adaptée pour la spécification de Workflows de production ou de flux logistique. D'une part, les spécificités des données transitant dans un flux de production doivent être identifiées de manière à être gérées par un logiciel de production et exploitées à la fin du flux. D'autre part, certaines définitions de cette DTD sont liées aux flux de travail administratif. Ils ne sont pas utiles pour les flux de notre étude et peuvent compliquer la description pour les utilisateurs non experts de Workflow.

Ainsi, nous avons proposé dans [R8] [R11] un langage graphique simple pour représenter les composants impliqués dans un Workflow dédié à la représentation des systèmes de production. Un modèle de processus de Workflow XML est composé de composants tâches (Figure 22 composants carrés) qui traitent des items ainsi que de composants contrôleurs (Figure 22 composants ronds) pour router les items entre les tâches. Les items (information produit, données de routage, etc.) passent par une séquence de ces composants. Les items sont traités jusqu'à l'accomplissement des missions (ex. ordonnancement et distribution d'un fret) par des ressources (serveur, smartphone, etc.). Nous détaillons, dans la Figure 22, le Workflow PRODIGE modélisé avec la LSIS_WME outil graphique (Workflow Model Editor) développé au Laboratoire LSIS de l'Université d'Aix-Marseille [R11]. Il représente le modèle d'échange d'informations (flux de données) entre les différents composants du Workflow de haut niveau. Ce modèle démarre par une tâche d'initialisation (symbole de lecture), et termine par une tâche finale (symbole d'arrêt). La Figure 22 illustre le fait que le flux d'informations est initié et terminé par le composant ressource serveur. Entre ces événements, plusieurs tâches de traitement de données sont affectées aux ressources présentées Figure 20, où les couloirs d'eau distinguent les responsabilités. En outre, le modèle contient des contrôleurs (AND-join, OR-split, etc.) pour acheminer les données entre les tâches. Notons que cet outil a été développé en 2006 avant l'avènement de BPMN 2.0. Il a été réutilisé pour sa compatibilité HLA au travers des modèles G-DEVS sous-jacents qu'il embarque.

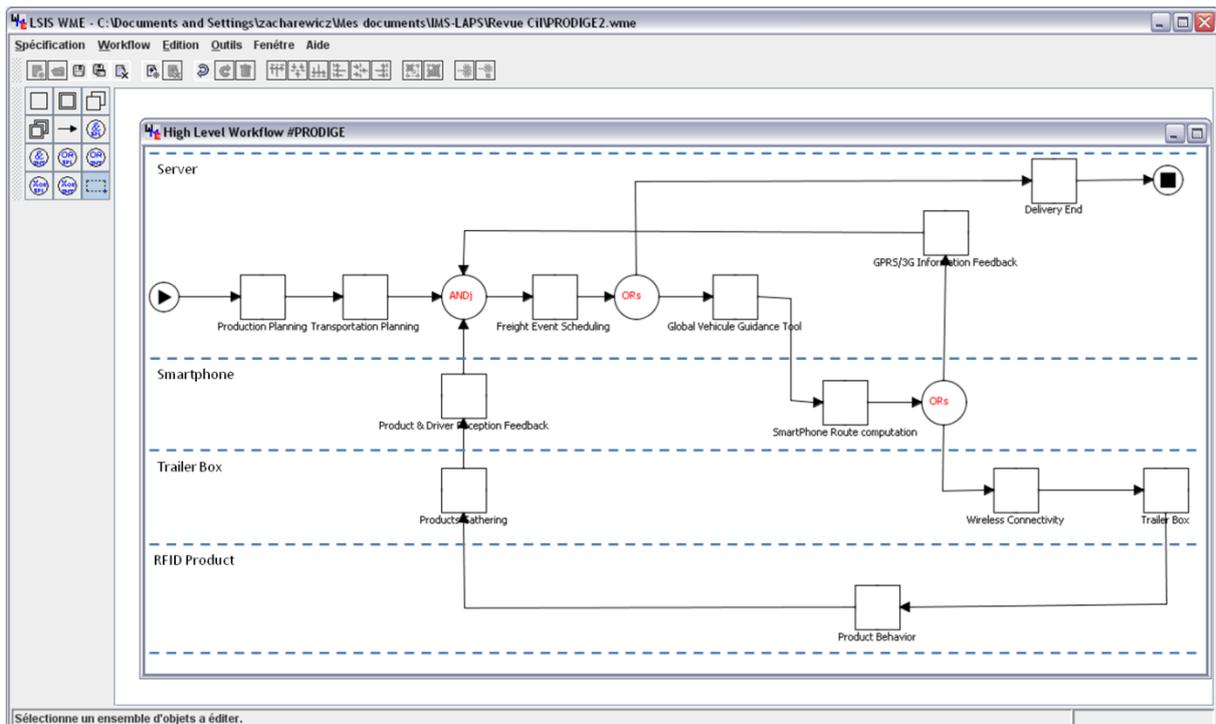


Figure 22. *Modèle Workflow Simplifié du Projet PRODIGE*

Les modèles de Workflows sont des modèles de haut niveau, de sorte qu'ils doivent être raffinés pour la simulation. Depuis le début des recherches sur les Workflows, plusieurs techniques de modélisation ont été utilisées pour développer des moteurs de simulation de flux de travail. Plusieurs outils de Workflow basés sur les réseaux de Petri sont maintenus depuis le début des spécifications de flux, par exemple, Yasper et Yole rappelés dans [R11].

Dans [R8], les auteurs ont présenté les fonctionnalités de LSIS_WME pour générer la spécification G-DEVS utilisant les modèles de transformation XSLT (*eXtended Style Sheet Language Transformation*) de XML. Dans le cadre de la modélisation et simulation de PRODIGE, certaines parties du modèle de Workflow ont été transformées en un modèle G-DEVS couplé par couplage de modèles G-DEVS atomiques (Figure 23). Une bibliothèque de modèles de logistique a été proposée et des relations de couplage du modèle couplé ont été générées. A partir du modèle de Workflow, le modèle G-DEVS a permis de supprimer des indéterminismes, des ambiguïtés et des imprécisions temporelles pour profiter de l'approche formelle pour la simulation. Le modèle PRODIGE contient deux modèles G-DEVS et d'autres composants logiciels. L'interopérabilité HLA a permis d'effectuer par simulation distribuée la validation de la cohérence des flux d'informations qui doivent être échangés entre les partenaires avant l'exécution réelle. Des travaux précédents utilisant HLA pour assurer l'interopérabilité ont été réutilisés pour le cas d'application de partenaires logistiques.

4.5.4.4 Composants de M&S G-DEVS (sous partie du Workflow)

Afin de valider les propriétés de comportement de la plateforme, une sous-partie des ressources de Workflow a été transformée en modèles G-DEVS atomiques et couplés. Les simulations de ces modèles connectés à d'autres composants ont été exécutées en utilisant les propriétés d'interopérabilité de simulation distribuée HLA. Nous présentons le modèle couplé G-DEVS dans la Figure 23.

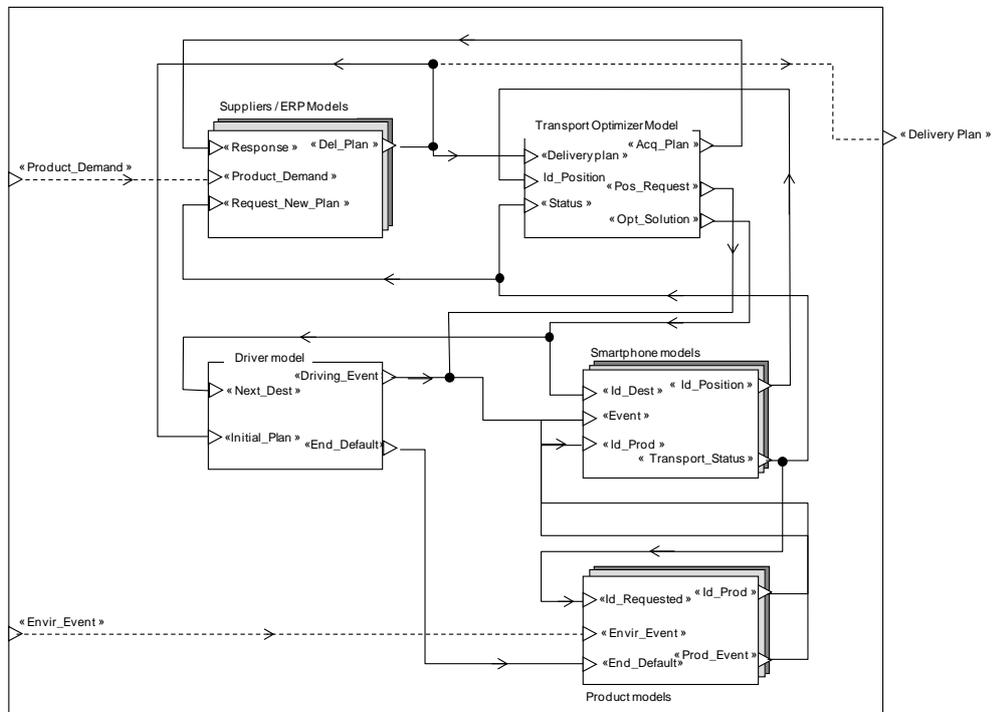


Figure 23. Modèle Couplé G-DEVS de PRODIGE

Ce modèle est composé des modèles G-DEVS atomiques du transporteur et des conducteurs et des modèles G-DEVS multi-instances du smartphone, des fournisseurs et des produits. Ces derniers sont instanciés et paramétrés en fonction de leurs caractéristiques spécifiques. Le comportement du smartphone et du produit sont détaillés dans [R7] au regard du plan de production des fournisseurs et des prérogatives de logistique de l'optimiseur.

La partie du composant de guidage de véhicule n'a pas été dans la portée de notre étude, elle est incluse dans l'optimiseur de transport développé par (Tchapnga, et al., 2012). Nous avons supposé que l'optimiseur génère des coordonnées cartésiennes intermédiaires pour le guidage des véhicules qui sont intégrés comme des événements. Également la composante « dépôt/ERP » n'est pas modélisée dans la plateforme de simulation. Son comportement est exprimé par un événement des plans de commande de produits. Chaque nouveau plan peut concurrencer les demandes exprimées lors des précédentes itérations. Le plan de livraison est connecté en pointillés avec la sortie du modèle couplé. Jusqu'à présent, le comportement des clients n'est pas simulé sauf dans l'expression du plan de la demande de produits.

4.5.5 Technologies de Développement

Ce premier développement pour PRODIGE a été réalisé dans l'environnement de codage Eclipse Java en utilisant le moteur de simulation HLA de modèle G-DEVS mis en œuvre à partir des spécifications de LSIS_DME (*DEVS Model Editor*) [R12]. Enfin, le RTI HLA du projet (PoRTico, 2012) a été utilisé pour l'orchestration distribuée.

4.5.5.1 LSIS DME

LSIS_DME a été choisi pour la modélisation et la simulation des modèles Workflows. Les raisons de ce choix reposent sur l'éditeur de modèle Workflow et G-DEVS codé en Java. Le moteur d'exécution est également basé sur la simulation G-DEVS (Giambiasi, et al., 2000) [C8]. De plus, cet outil est étendu pour être compatible HLA [R8] [R12]. Il met en œuvre les fonctions de rappel de la classe *FederateAmbassador* pour l'utilisation de *RTIAmbassador* à communiquer avec le RTI. En conséquence, les modèles peuvent être simulés dans un environnement distribué [R8]. LSIS_DME a également permis d'effectuer des simulations distribuées et connectées avec d'autres composants (ex. un générateur d'ordres clients, une base de données, un émulateur de déplacement, etc.). Un moteur de simulation dérivé de la solution LSIS_DME et dédié à la plateforme PRODIGE a été codé en utilisant l'environnement de développement logiciel Eclipse. Le langage Java a été préféré pour sa portabilité sur les principaux systèmes d'exploitation, la capacité de développer des applications web légères et d'échanger des informations au format XML. LSIS_DME avait été configuré pour communiquer avec un RTI commercial. Pour ce projet, le simulateur distribué est migré vers le RTI open source poRTico [T2] (voir point suivant). La plateforme exécutait l'algorithme de synchronisation conservateur de GDEVS / HLA [R13] [C19] [C20].

4.5.5.2 Outil de Simulation Distribuée : HLA RTI poRTico

Les données doivent être synchronisées et interopérables entre les différentes applications qui les échangent et les traitent. À cette fin, un RTI HLA a été utilisé. Un état de l'art sur différentes mises en œuvre du RTI HLA a été réalisé. Un comparatif entre open source, freeware et solutions commerciales des RTI a été mené. Le RTI choisi pour ces fins à l'échange de données est PoRTico RTI (PoRTico, 2012). La principale raison de ce choix vient du développement de cet outil en Java open source certifié HLA 1.3 et conforme 1516.

poRTIco a été intégré et paramétré sous Eclipse par [T2]. Le fichier FOM (*Federation Object Model*) comprend les objets et attributs HLA à partager. Ces objets sont principalement des produits avec leurs caractéristiques, leurs géolocalisations et leurs points de passage. Les fédérés impliqués dans la plateforme sont les modèles G-DEVS présentés dans la Figure 23 et d'autres applications logicielles hétérogènes.

Enfin, des jeux de tests théoriques, élaborés en collaboration avec le fournisseur de services de transport impliqué dans le projet, ont permis de valider et qualifier la première version des composants de la plateforme en exécutant des scénarios de simulation. La base de données de la remorque contenant les produits a été mise en œuvre comme une base de données Access. L'élément de support a été mis en œuvre par un générateur de position Java (longitude et latitude extrait d'un GPS commercial). L'algorithme pour le routage a été spécifié et développé indépendamment dans le cadre de la thèse (Tchapnga, et al., 2012).

4.5.6 Premiers résultats de Simulation

L'approche PRODIGE pour construire la plateforme physique, a consisté premièrement à modéliser, simuler et valider tous les comportements des composants. Chaque modèle G-DEVS a été implémenté en utilisant LSIS_DME, testé séparément, puis connecté à la plateforme poRTIco HLA [T2]. Dans une deuxième étape, lorsque la simulation a confirmé un mode de fonctionnement correct (au regard des spécifications), le composant simulé a été remplacé par son homologue réel. Ce composant physique était couplé à une sortie traducteur d'entrée au système HLA (par exemple une classe *FederateAmbassador* C++ ou Java) pour communiquer avec le reste du système par l'intermédiaire de la plateforme de réseau d'interconnexion. La vérification de l'interopérabilité des composants réels du système s'est donc réalisée progressivement.

La simulation distribuée a bien permis de valider le choix stratégique concernant le comportement des composants à développer en composants logiciels ou matériels de la solution finale de PRODIGE. Cependant la limitation de ce système a résidé dans son orientation en simulation distribuée (avec HLA). Le système ne permettait pas en l'état de communiquer par appel de services. Les travaux de Zhiying Tu [T1] ont spécifié cette extension, que Judicael Ribault [P1] a mis en œuvre. La sous-section suivante présente l'ensemble des outils et techniques utilisés dans la 2ème expérimentation informatique du Workflow PRODIGE, tels que les services web et le système de gestion de Workflows Taverna. Elle précise les contributions et développements nécessaires à la création de scénarios au sein de Taverna.

4.5.7 Contribution de Judicaël Ribault pour un Workflow d'Orchestration

Judicael Ribault [P1] dans le cadre de son post doc a implémenté les séquences d'actions spécifiées dans les modèles couplés à base de modèles comportementaux présentés dans la Figure 20 et détaillés dans [R7]. Ce travail a permis de lier les modèles de l'environnement réel spécifié en G-DEVS et le SI PRODIGE (plateforme logicielle et acteurs humains) au travers d'une séquence d'actions Workflow [C6] [R1]. Ce système propose des services web à appeler depuis une page de services ouverte sur internet.

4.5.7.1 Conception du Workflow de services PRODIGE

Les Workflows de services permettent d'orchestrer rapidement et éventuellement simultanément plusieurs expérimentations utilisant la solution PRODIGE. En effet, l'expérimentation informatique n'a pas de contraintes temps réel auxquelles doit faire face

l'expérimentation réelle : une tournée de plusieurs heures peut être simulée rapidement. Parmi les possibilités offertes par l'expérimentation informatique, nous avons développé la possibilité de vérifier et déboguer la solution PRODIGE au cours de son développement. Ce parallélisme des tâches a permis un gain de temps et de ressources allouées au développement de la solution. L'expérimentation informatique a permis également de tester rapidement de nouvelles fonctionnalités. Une fois les fonctionnalités établies et vérifiées au sein de PRODIGE, l'expérimentation informatique permet de créer des scénarios d'utilisation mimant le comportement des différents acteurs (le gestionnaire, les clients, et les chauffeurs).

Les scénarios que nous avons exécutés ont eu plusieurs objectifs. Tout d'abord, effectuer des mesures quantitatives, en calculant plusieurs variables telles que le nombre de kilomètres parcourus par les produits ou la quantité d'émission de CO₂ produite pour un ensemble de livraison. Ensuite, suivre et tracer les différentes étapes que doit subir un produit (ex. délais de livraison, etc.) pour l'empreinte carbone par exemple. Enfin, l'objectif peut être analytique, afin d'observer un cas particulier non compris ou difficile à reproduire avec le système réel. A cela s'ajoute des scénarios de démonstrations, permettant d'expliquer la solution PRODIGE et de suivre le mouvement des véhicules en fonction du scénario choisi.

4.5.7.2 Contexte Technologique

Cette section présente premièrement le concept de service web et son implication dans l'expérimentation de l'application PRODIGE, puis le système de gestion de Workflow Taverna qui est utilisé pour créer et exécuter des scénarios d'expérimentations de la solution.

4.5.7.2.1 Service Web

Les services web peuvent être classés en deux catégories. Tout d'abord, les services web « *REpresentational State Transfer* » (REST) (Richardson & Ruby, 2007), qui manipulent des représentations XML de ressources web à l'aide d'un ensemble uniforme d'opérations HTTP (GET, PUT, POST, DELETE) et d'URI. Puis les autres services web, qui exposent un ensemble d'opérations exécutables à distance à l'aide des standards SOAP et WSDL (W3C, 2001) qui facilitent l'interopérabilité.

PRODIGE est une application web exposant des méthodes grâce à l'utilisation de services web SOAP. Il est alors possible, à distance, d'interagir avec l'application. Par exemple, après authentification, on peut ajouter un chauffeur ou un véhicule, créer une tournée ou encore connaître la position d'un véhicule. L'ensemble des méthodes, accessible par service web, permet d'interagir facilement avec l'application.

Afin de simuler le déplacement de véhicules au sein de l'application PRODIGE, nous récupérons l'ensemble des coordonnées GPS issues d'un trajet calculé via l'utilisation de l'API de Google Maps. Google Maps expose son API via l'utilisation de service web REST.

4.5.7.2.2 Taverna

Taverna (Hull, et al., 2006) est une application qui facilite l'utilisation et l'intégration d'outils et de bases de données disponibles sur le web, en particulier les services web. Il permet aux utilisateurs qui ne sont pas nécessairement des programmeurs experts de concevoir, exécuter et partager des Workflows. Ces Workflows peuvent intégrer des ressources différentes dans une seule expérimentation. Un Workflow Taverna peut contenir plusieurs services. En particulier, Taverna propose un service d'exécution de code Java directement en son sein. Il peut aussi exécuter une application distante via le protocole REST. Enfin, il permet encore d'exécuter une application distante via le protocole SOAP/WSDL.

Un service Taverna récupère des données d’entrées, les transforme, les connecte et produit des sorties. La valeur d’une entrée peut faire partie du Workflow (« *hardcoded* ») ou être un paramètre à renseigner lors de l’exécution du Workflow. Un service REST renvoie systématiquement 2 sorties prédéfinies : la valeur de retour du service web (ex. 200 si ok ou 404 si ressource introuvable), et le contenu de la réponse (ex. un fichier XML, HTML, ZIP). La Figure 24 représente un service REST dans Taverna. Le nombre d’arguments en entrée est variable et choisi par le développeur du Workflow. Le nombre d’arguments en sortie est fixe.

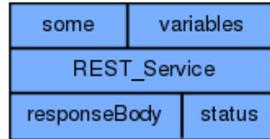


Figure 24. *Service REST Taverna*

A l’opposé, un service WSDL va trouver automatiquement grâce au fichier WSDL le nombre et le type d’arguments corrects en entrée et en sortie. La Figure 25 représente un service WSDL en vert au milieu de la figure. Le service est disponible dans Taverna après l’ajout de l’URL du fichier WSDL (<http://xxx.xxx.xxx.xxx:8080/WS-PRODIGE/services/Identification?wsdl>) contenant la description du service. Taverna offre alors la possibilité de formater automatiquement les entrées et sorties en fonction du type de paramètres exigés par le service web. Dans cet exemple, le service web « *identificationChauffeur* » qui permet à un chauffeur de s’identifier au sein de la solution PRODIGE prend en entrée une donnée de type « *identificationChauffeur_input* » qui encapsule : *id*, *imei*, et *pwd*. Le service web produit en sortie une donnée de type « *identificationChauffeur_return* » qui encapsule des données (ex. *firstName*, *lastName*, etc.).

Les Workflows sont particulièrement adaptés pour automatiser des expérimentations, mais tous les paramètres nécessaires ne peuvent pas toujours être spécifiés à l’avance. Dans ces cas, il est souhaitable d’interagir avec les utilisateurs pour la prise de décision. Taverna propose plusieurs interfaces permettant d’interagir avec l’utilisateur à l’aide de boîtes de dialogue, de listes, etc. Un Workflow Taverna peut également contenir des Workflows hiérarchiques imbriqués. Un ensemble de Workflows permettent aisément de concevoir des Workflows plus complexes. Ces Workflows peuvent ensuite être partagés sur *MyExperiment*.

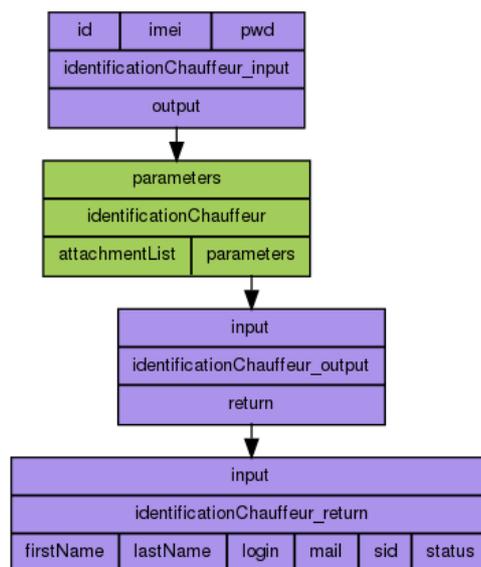


Figure 25. *Service WSDL Taverna*

MyExperiment (Goble, et al., 2010) est un environnement en ligne permettant de trouver, partager et réutiliser des Workflows. MyExperiment permet aux utilisateurs de trouver des Workflows en rapport avec leur recherche, de les réutiliser et de les adapter à leur besoin spécifique. Les développeurs qui créent leurs propres Workflows peuvent les soumettre à *myExperiment* afin de contribuer à la communauté. *MyExperiment* ajoute un aspect social, permettant aux développeurs d’obtenir des commentaires des utilisateurs qui réutilisent leurs travaux. Depuis 2007, *myExperiment* compte plus de 5000 utilisateurs et 2000 Workflows.

4.5.7.3 Contribution et Développement de la Simulation d’un Véhicule

Cette section décrit l’ensemble des travaux que nous avons effectués dans le cadre du Post doc de Judicaël Ribault [P1] afin de pouvoir utiliser les Workflows Taverna comme base de nos scénarios d’utilisation de PRODIGE. Il se focalise sur les services web, les modèles de simulation sous-jacents ne sont plus détaillés ici.

4.5.7.3.1 Préambule Technique

PRODIGE est une solution déployée sur un serveur de production. Afin d’être d’une part indépendant des expérimentations, et d’autre part de pouvoir tester le processus d’installation de la solution. Nous avons déployé la solution PRODIGE sur un serveur indépendant dans les locaux de l’IMS. La liste des services web PRODIGE est accessible par cette URL : <http://xxx.xxx.xxx.xxx:8080/WS-PRODIGE/services/listServices>. Cette liste permet d’accéder au fichier WSDL correspondant à chaque classe de service web PRODIGE. Afin de pouvoir utiliser un service web PRODIGE dans un Workflow Taverna, il faut au préalable importer le fichier WSDL correspondant dans Taverna. La Figure 26 illustre l’ensemble des fichiers WSDL PRODIGE accessible dans Taverna et fait apparaître 3 services web permettant l’identification. L’importation de commandes au sein de PRODIGE se fait via le *Global Standards* (GS1, (GS1, 2011)). Nous avons créé un *template* GS1 permettant de créer des commandes directement au sein de Workflow Taverna. Un fichier GS1 contient toutes les informations relatives à une demande de livraison entre un client et un service de transport.

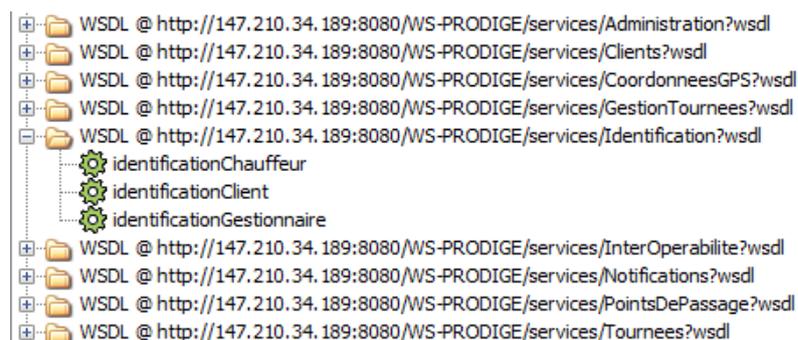


Figure 26. Liste des Services PRODIGE Importés dans Taverna

La Figure 27 illustre l’architecture globale du système PRODIGE. Les différents acteurs (Clients, Gestionnaire, Chauffeur) utilisent une application légère disponible sur leur ordinateur ou leur smartphone pour communiquer avec le serveur PRODIGE. La simulation orchestre, au travers des Workflows de scénario, le même type de communication avec le serveur PRODIGE. Ainsi, le serveur ne peut pas faire de différence entre une expérimentation de simulation et une expérimentation réelle. Les composants simulés sont en G-DEVS et font appel à l’approche service développée par Z. Tu [R2] pour la simulation distribuée HLA.

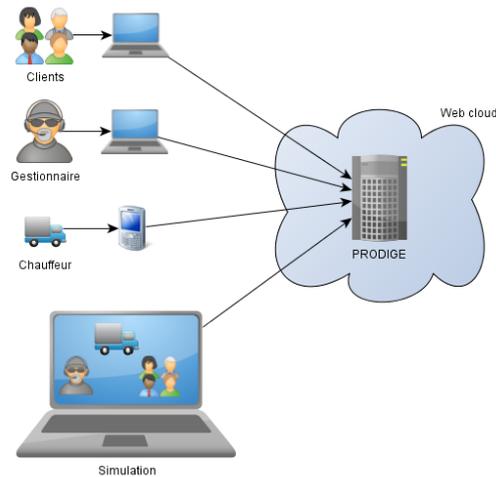


Figure 27. Architecture de l'Environnement PRODIGE

4.5.7.4 Mashup avec Google Maps

Afin de pouvoir piloter virtuellement un véhicule au sein de la solution PRODIGE, plusieurs actions ont été indispensables. Premièrement, il a été nécessaire de remplir le distancier de PRODIGE afin que le système ait la connaissance de la distance et du temps de parcours entre deux points de passages. Deuxièmement, il faut récupérer l'ensemble des coordonnées GPS permettant d'aller d'un point à un autre. Troisièmement, il est nécessaire d'échantillonner le parcours pour simuler le comportement du camion. Il est possible d'intégrer des comportements complexes au sein de modèles DEVS pour un camion, smartphone ou conducteur [R7] et envoyer les coordonnées GPS à intervalle régulier, comme le ferait le smartphone embarqué dans un vrai véhicule.

4.5.7.5 Construction du Distancier

Pour peupler le distancier PRODIGE, il est nécessaire de connaître la distance et le temps nécessaires à un véhicule pour aller d'un point A à un point B. PRODIGE se base sur les données issues de la cartographie (SYGIC, 2014). Or SYGIC ne permet pas d'exporter l'ensemble des coordonnées GPS d'un parcours, ce qui est nécessaire pour simuler le comportement du smartphone dans un véhicule. De ce fait, nous avons choisi d'utiliser Google Maps qui permet via son API accessible en service web REST, de récupérer le temps de trajet, la distance, et l'ensemble des points GPS qui caractérise un parcours.

La documentation de Google Maps (Google, 2014) présente les fonctions de requêtes permettant de récupérer l'ensemble des informations dont nous avons besoin au format XML et d'appeler l'API REST selon l'URL suivante :

<http://maps.googleapis.com/maps/api/directions/xml?origin={coordinateStart}&destination={coordinateEnd} &sensor=false>

où *{coordinateStart}* et *{coordinateEnd}* doivent être remplacés respectivement par les coordonnées des lieux de départ et d'arrivée. Le résultat d'une telle requête est un fichier XML contenant entre autre :

```
<duration>           <value>8126</value>   <text>2 heures 15
minutes</text> </duration> <distance>   <value>167391</value>
<text>167 km</text> </distance>
```

Il reste donc pour remplir le distancier à extraire de l'ensemble du fichier XML les valeurs de durée (ici 8126 secondes) et de distance (ici 167391 mètres) et à les envoyer à la base de données que constitue le distancier. Pour faire cela dans Taverna, nous utilisons le service

REST de Taverna pour exécuter la requête auprès de Google Maps, puis nous utilisons le service XPATH permettant d'extraire des données d'un fichier XML, finalement nous utilisons un service *BeanShell* pour exécuter un petit code en JAVA qui va remplir le distancier avec les valeurs extraites. Ce Workflow est représenté par la Figure 28. En bleu est décrit le service REST de Taverna qui va exécuter l'appel à l'API de Google Maps. Ce service prend en entrée quatre valeurs correspondant à deux couples de coordonnées GPS. Ces informations sont extraites à l'aide d'un service *Beanshell* (en violet) qui va se connecter au distancier et récupérer les lignes dont les données ne sont pas encore remplies. Le deuxième service Beanshell (en marron) va extraire les coordonnées GPS de la réponse de la requête SQL. Enfin, le contenu XML issu de Google Maps est envoyé au service XPATH (en jaune) pour extraire la distance et le temps de parcours. Ces informations sont ensuite rassemblées dans une requête SQL grâce à un service *Beanshell* (en marron en bas), puis la requête de mise à jour sera exécutée à l'aide du dernier service *Beanshell* (en violet en bas).

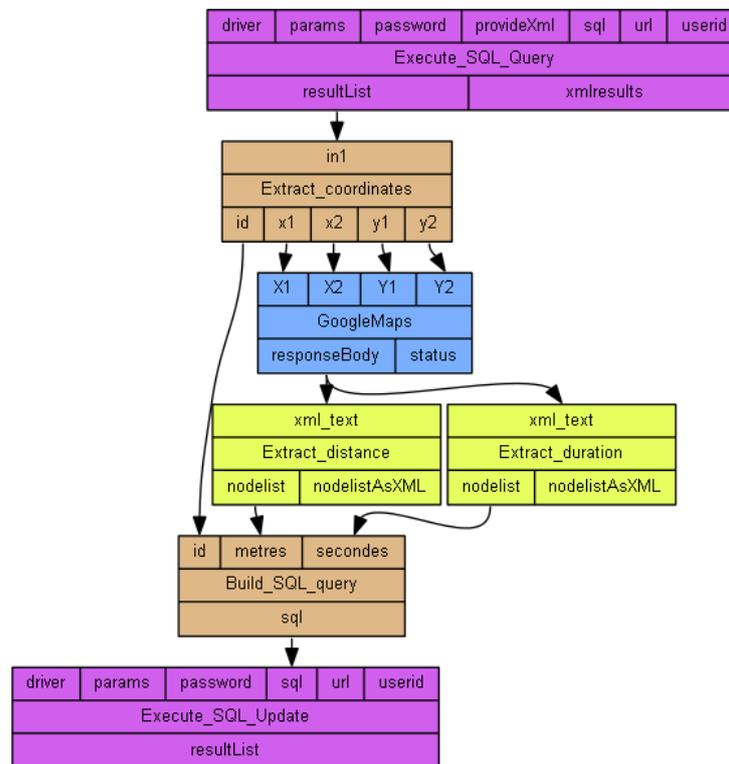


Figure 28. Workflow Taverna de Mise à jour du Distancier PRODIGE

4.5.7.6 Récupération des Coordonnées GPS

Afin de simuler le déplacement d'un véhicule, il est nécessaire de récupérer l'ensemble des coordonnées GPS d'un trajet. Pour cela, nous avons réalisé un Mashup entre les services de PRODIGE et ceux de Google Maps. Le Workflow de la Figure 29 illustre comment Taverna a facilité cette tâche. Deux appels à des services web de PRODIGE (en verts) peuvent être visualisés pour récupérer les informations relatives à deux points de passage dont on ne connaît que l'identifiant (id). Les coordonnées de ces points de passage sont ensuite extraites à l'aide de service Taverna XPATH (en jaunes). De la même manière que pour le calcul du distancier, un appel au service web de Google Maps pour récupérer l'ensemble des informations d'un trajet entre deux points est effectué (en bleu). Le dernier service XPATH (en jaune en bas) extrait le « *polyline* » qui représente l'ensemble des coordonnées GPS que constitue la représentation d'un trajet sur une carte. Ce « *polyline* » encode les coordonnées

GPS tel que décrit par (Google, 2014). Finalement, le Workflow ci-dessous décode à l'aide du dernier service (en marron en bas) le « *polyline* » en coordonnées GPS.

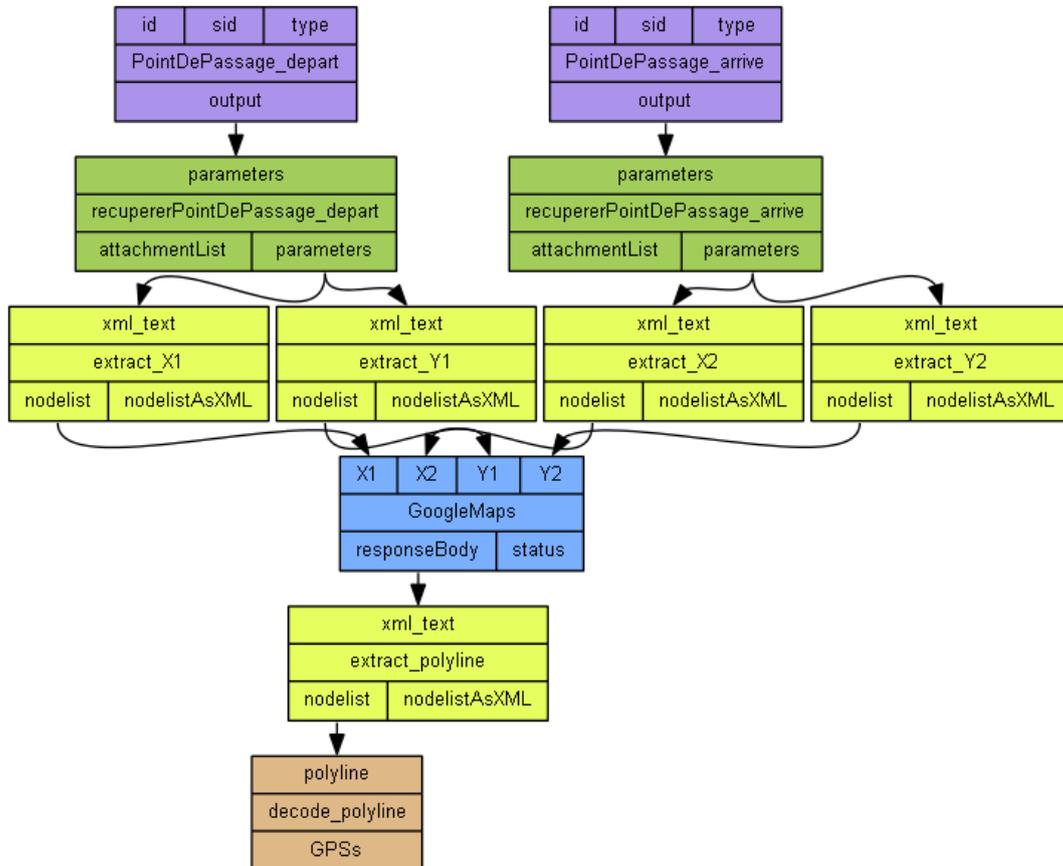


Figure 29. *Extraction des Coordonnées GPS depuis Google Maps*

4.5.7.7 Echantillonnage et Envoi des Messages à PRODIGE

Pour simuler le déplacement d'un véhicule, le Workflow doit envoyer à la solution PRODIGE les coordonnées GPS du véhicule comme le ferait le smartphone embarqué dans un véhicule réel. Il faut pour cela échantillonner un ensemble des coordonnées GPS extraites de Google Maps et leur associer un « *timestamp* » (date). Par exemple pour un trajet représenté par 1000 coordonnées GPS, un temps de trajet de 60mn (soit 3600 secondes), et un départ simulé le 1er octobre 2012 à 10h00mn00s (timestamp référence de 1349078400), la première coordonnées GPS sera associée au *timestamp* de référence + $3600 \cdot 1/1000$, la deuxième au *timestamp* de référence + $3600 \cdot 2/1000$, ..., la nième au *timestamp* de référence + $3600 \cdot n/1000$. L'ensemble de ces couples (coordonnées GPS, timestamp) peut ensuite être envoyé à PRODIGE de différentes manières :

- en une seule fois : un seul appel au service web de PRODIGE en passant en paramètre l'ensemble des couples (coordonnées GPS, *timestamp*). Cette solution a l'avantage d'être rapide, mais ne permet pas d'introduire des aléas au sein d'une tournée.
- En temps réel : l'envoi au service web de PRODIGE s'effectue en temps réel. A chaque fois qu'un timestamp est atteint, on envoie le couple (coordonnées GPS, timestamp) à la solution PRODIGE. Cette solution est idéale si on veut coupler des véhicules virtuels et des véhicules réels au sein de la même expérimentation.
- En temps accéléré : l'envoi émet à intervalle régulier un certain nombre de couples de données et donne le temps nécessaire à la simulation d'une tournée. Cette méthode

permet d'introduire facilement des aléas (mais impose de recalculer le *timestamp* des couples).

4.5.8 Démonstration

Cette section démontre la faisabilité au travers d'un scénario de démonstration Taverna. La Figure 30 représente un extrait du scénario complet (de par la taille du scénario, il est difficile de représenter l'intégralité dans ce document). Ce Workflow est hiérarchique et l'on distingue cinq parties distinctes.

Le premier sous Workflow, en haut, contient un ensemble de jeu de données réutilisé depuis d'autres modèles Workflows tels que les informations des clients, les points de passage, les comportements des chauffeurs, les véhicules, et les smartphones. Le deuxième sous Workflow (qui contient lui-même huit sous-Workflows) est un Workflow générique qui permet, pour un ensemble d'entrées, d'alimenter le système PRODIGE. Suite à l'exécution de ce Workflow à partir de données réelles ou simulées, le système PRODIGE est prêt, il contient l'ensemble de point de passage donné, de client, de chauffeur, de véhicules et de tablettes d'un scénario. Le troisième sous Workflow est le Workflow déjà présenté dans la Figure 28 et qui remplit le distancier après l'ajout des différents points de passages. Le quatrième sous Workflow permet en séquence de fabriquer un fichier GS1 valide en fonction du jeu de données initial contenu dans le premier sous Workflow, de créer une commande de livraison dans PRODIGE à l'aide du fichier GS1 précédemment créé, de lister l'ensemble des commandes de livraisons en attente de validation, de valider les commandes de livraisons, de demander le calcul d'une tournée prenant en compte l'ensemble des livraisons à faire, de lister l'ensemble des tournées en attente de validation et enfin de valider les tournées. Le cinquième sous Workflow, au bas de la figure, permet de débiter la tournée, de charger la marchandise en communiquant le modèle du smartphone et de la remorque, d'envoyer les coordonnées GPS en une seule fois, de décharger la marchandise, d'envoyer les coordonnées GPS de retour en une seule fois et enfin de terminer la tournée.

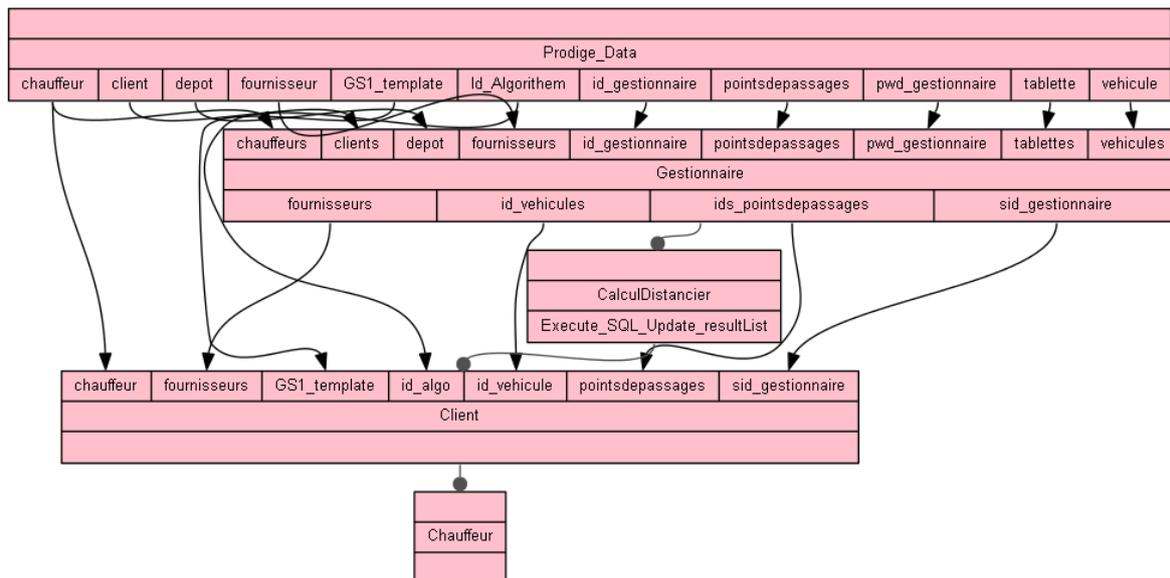


Figure 30. Workflow Taverna décrivant un Scénario Complet d'Utilisation de PRODIGE

La Figure 31 présente une vue détaillée d'un sous Workflow du deuxième sous Workflow de la Figure 30. Ce Workflow permet de s'authentifier en tant que gestionnaire dans l'application PRODIGE. Ce Workflow prend 2 entrées (*id* et *password*) et produit une sortie

(*service identifier*, (SID)). Le premier composant violet formate les données passées en entrée pour correspondre au format attendu par le service web. Le composant vert effectue l'appel de méthode distante sur le serveur PRODIGE via le protocole SOAP, et envoie les données formatées nécessaires à l'identification sur le serveur PRODIGE. Les 2 composants violets suivants permettent d'extraire les informations nécessaires pour la suite du déroulement du Workflow. Ici le SID permet de s'authentifier lors des appels de méthodes distantes pour utiliser la solution PRODIGE en tant que gestionnaire. L'ensemble des fonctionnalités proposées par PRODIGE sont orchestrées de cette manière au travers de Taverna. Il est aussi possible à travers ce moyen de piloter l'application PRODIGE dans son ensemble (ajout de chauffeur, livraison, suivi de tournée, etc.). Ces résultats ont été publiés dans [R1]. Nous notons que dans cette deuxième solution HLA n'a pas encore été intégré, seule l'approche service connecte les modèles et les services web. La connexion complète des services web, du modèle de processus et d'HLA est une perspective présentée section 5.

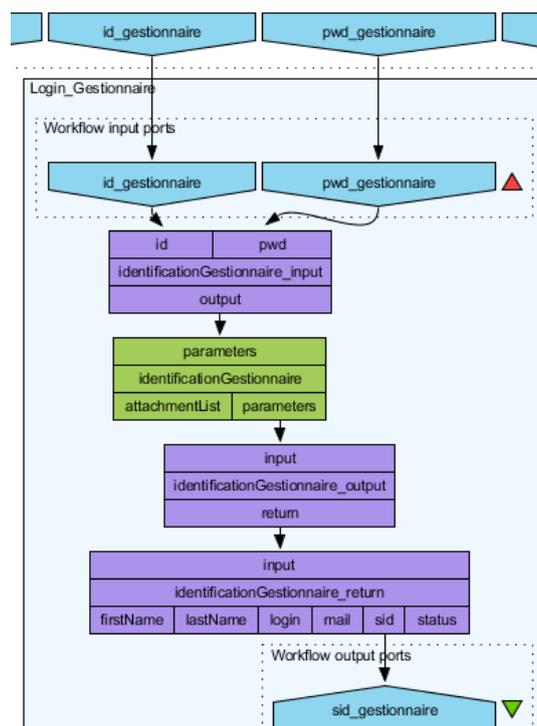


Figure 31. Vue Détaillée d'un Sous-Élément du Workflow d'Authentification

4.5.8.1 Visualisation

La Figure 32 présente la visualisation d'une tournée. Le trait bleu sur la carte représente le parcours effectué par le véhicule. La position du véhicule (logo noir en bas du parcours) est visible en temps réel sur la carte. La visualisation se fait de manière transparente à l'aide de l'application PRODIGE. En effet, l'utilisation de Workflow de service ne se distingue d'aucune manière, au niveau logiciel, comparée à l'utilisation de véritables véhicules. Il est d'ailleurs envisageable de mixer l'utilisation de véhicules virtuels et de véhicules réels au sein d'une même expérimentation, permettant de visualiser indifféremment l'ensemble des véhicules se déplaçant sur la carte.

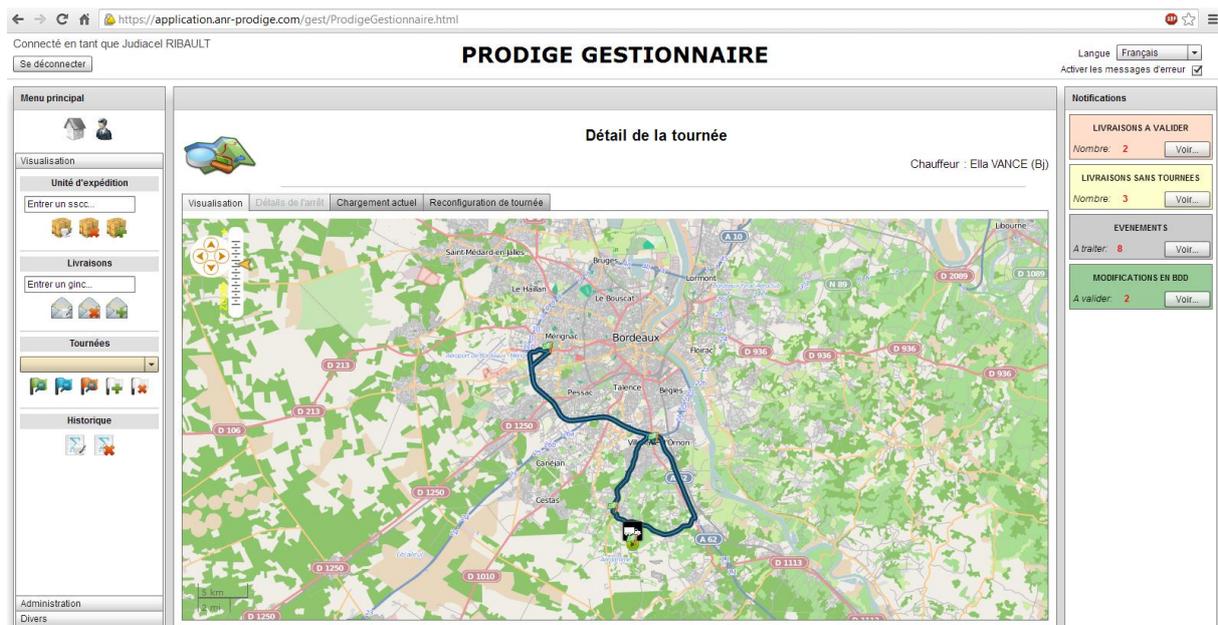


Figure 32. Visualisation d'une Tournee en Cours dans PRODIGE.

4.5.9 Conclusion

Cette sous-section a permis de présenter les travaux réalisés dans le cadre du Post-doc de Judicael Ribault accomplis dans le cadre de PRODIGE. Ces travaux ont modélisé des Workflows de service et les ont simulés [C6] [R1]. Ces travaux s'intègrent dans la dimension orchestration de Workflows et interopérabilité avec des composants simulés. Ils implémentent l'aspect service qui permet de se connecter au bus d'interopérabilité de la plateforme énoncée en section 4.2.4. Ces travaux s'inscrivent dans les enjeux de recherche décrits dans (FUTURPROD, 2013) en préconisant l'usage de la simulation pour l'évaluation prédictive du système dans la cadre d'une future usine numérique. La facilité de connexion supportée par l'approche service web s'intègre également dans les objectifs de l'approche fédérée de l'EI qui demande de pouvoir connecter les composants sans effort. Même si nous avons ici une interopérabilité technique sous-jacente.

L'exécution du Workflow a permis de vérifier et de corriger des scénarios d'action recevables par la plateforme PRODIGE. Les simulations ont également permis de définir un cadre normé d'utilisation de la plateforme. La combinaison entre système réel et agents artificiels (Workflow de services + Modèles Simulés) permet de proposer et de jouer des situations d'utilisation en simulant l'immersion du système dans son environnement réel en évitant de solliciter les objets matériels (ex. nombre de véhicule disponibles et déplacements, possibilité de rejouer des scénarios rapidement, etc.). La prochaine étape dans une perspective de 3 ans est de permettre la connexion et la génération automatisée des Workflows de service et de simulation à partir du modèle BPMN de la SLMToolBox. Ceci a été décrit dans des papiers de positionnement [C2] [C3] et sera présenté dans la section 5.2.

4.5.10 Résultats

Nous avons publié sur ce domaine **2 articles dans des revue indexées [R1] et [R7]**, 1 papier invité [I2] en conférence et 3 articles en conférence et avons été **sélectionnés pour une revue**. J'ai assuré l'encadrement de Post Doc [P1] (2012) à 100%. A l'issue de son Post Doc, **Judicael Ribault a fondé à Bordeaux son entreprise de développement logiciel lié à la M&S** et ce dernier continue à collaborer avec l'IMS sur des actions de recherche.

4.6 Méthodologie de Transformation de EA* vers BPMN puis DEVS

4.6.1 Introduction

Les tendances du marché et les habitudes actuelles des clients démontrent que l'entreprise manufacturière traditionnelle, en Europe et dans le reste du monde, devra migrer progressivement de l'entreprise traditionnelle centrée sur le produit vers une approche Produit + Service (PSS) (Thoben, et al., 2001). Aussi, afin de diversifier son offre globale, l'entreprise devra collaborer au sein d'un écosystème pour composer son offre avec celles de partenaires. Les prospectives (FINES, 2012) et (FUTURPROD, 2013) convergent sur ce point de vue. Par conséquent, ces entreprises s'inscriront dans une ou plusieurs entreprises virtuelles (organisation virtuelle temporaire à but lucratif, composée de sociétés visant à produire un produit et ses services connexes). Cet écosystème de services accompagnera le cycle de vie des services du stade de création jusqu'à la livraison.

Il paraît donc aujourd'hui nécessaire de soutenir cette transition de contexte pour les entreprises, qui entraîne leur business initialement centré sur le produit vers le monde des services et la collaboration d'entreprises. Cet écosystème de fabrication virtuelle devra être modélisé, afin de prendre en compte clairement la vision des entreprises et surmonter les obstacles d'interopérabilité. Par ailleurs, afin de mieux définir et mettre en œuvre le système de services, un soutien méthodologique du cycle de vie des services, pourra séparer les préoccupations (point de vue utilisateur et développeur technique). Le point de vue de l'utilisateur est plus axé sur la définition du produit et du service. Sa préoccupation inclut la modélisation des processus et des décisions pour le futur SI ; elle ne comprend pas les contraintes de mise en œuvre. Les modèles permettront de guider le cycle de vie de service, de le tester et de le valider avant sa mise en œuvre. L'objectif principal de ce travail de recherche est donc de définir un système logiciel capable d'apporter un soutien à la mise en œuvre progressive du PSS en prenant progressivement en compte les contraintes techniques.

Une approche dirigée par les modèles pourrait être particulièrement adaptée pour soutenir la formalisation du système du fait qu'elle utilise des modèles d'entreprises normalisés et acceptés par les décideurs professionnels. Cette approche devrait faciliter l'ingénierie de système en prenant graduellement en compte les contraintes techniques. La spécification captera d'abord dans un modèle les besoins des utilisateurs finaux de services sans considérations techniques. La méthodologie repose sur une approche axée sur les modèles, y compris la transformation de modèles pour soutenir le service issu d'une conception humaine, puis en ajoutant les contraintes informatiques pour préparer la mise en œuvre. Nos travaux ont proposé d'effectuer la transformation des modèles à fort niveau d'abstraction avec le formalisme EA* (Doumeingts, 1984) vers BPMN (OMG, 2011) qui est reconnu par les acteurs métiers mais aussi les technologues. Nous avons ensuite proposé une transformation de BPMN vers DEVS (Zeigler, et al., 2000) pour effectuer des simulations de scénario afin de valider les comportements. Ces travaux ont principalement été menés dans le cadre de la thèse d'Hassan Bazoun, co-encadrée avec Yves Ducq, et du Master de Yousef Bouanan [M4] pour les premiers « matching » des concepts. Cette section se termine en démontrant l'intérêt de cette approche sur un cas pilote de e-marché. Ce travail est réalisé dans le cadre du projet MSEE (Ecosystèmes de la fabrication de service) (MSEE, 2012). Ce projet est intégré au programme FP7 – (FoF-ICT-2011.7.3, 2011) et financé par la Communauté Européenne pour les usines du futur (*Factories of the Future FoF*). Notre participation au projet MSEE se concentre sur la réalisation d'un outil accompagnant de bout en bout les opérations de modélisation du réseau de partenaires. Cet outil opérationnalisé sera un support pour la définition du Workflow qui orchestre les ressources de la plateforme présentée en 4.2.4.

La suite de cette section est répartie dans les sous-sections suivantes. La prochaine sous-section présente un état de l'art décrivant les réseaux collaboratifs *Collaborative Networks* (CN) comme contexte et les méthodes-dirigées-par-les-modèles utilisées pour la modélisation des services : SDA (*Service Driven Architecture*) et MDSEA (*Model Driven Engineering Service d'Architecture*). La troisième sous-section énonce le problème, pose le contexte pour le système de services et présente une revue de littérature sur la transformation de modèles. Elle insiste sur la justification des langages de modélisation choisis à chaque niveau de modélisation et la nécessité de transformer entre les niveaux de modélisation et entre les langages de modélisation. Ensuite les mécanismes de transformation de modèle entre *Extended Actigram** (EA*) et le modèle *Business Process Management Notation 2.0* (BPMN 2.0) et *Discrete Event Specification* (DEVS) sont décrits. La dernière sous-section est consacrée à l'étude de la transformation d'un modèle de e-place de marché pour valider les concepts proposés sur les modèles d'un problème concret et ainsi montrer la facilité à identifier les services à mettre en œuvre entre les partenaires.

4.6.2 Etat de l'art en Modélisation de Service

Ce travail commence à partir du postulat que les représentants des entreprises assis à la table de négociation en vue d'une collaboration peuvent gagner en efficacité en précisant sans ambiguïté le service qu'ils aimeraient mettre en place entre eux. Néanmoins, les représentants des métiers de l'entreprise qui initient la collaboration avec les partenaires ne sont généralement pas spécialistes en informatique. L'idée est de leur proposer un outil intuitif qui peut soutenir la définition de la collaboration grâce à un éditeur graphique convivial de modélisation. L'outil doit pouvoir incorporer une méthodologie de transformation de modèle pour générer le modèle technique qui sera en outre utilisé pour la mise en œuvre des services. Dans cet objectif un premier formalisme de modélisation avec un haut niveau d'abstraction est recherché, afin d'embrasser le maximum des concepts de la vue humaine dans la description d'un service. Ensuite, ce modèle doit être caractérisé et complété par les exigences informatiques. Plusieurs travaux de recherche ont déjà étudié ce domaine de recherche. Cette sous-section est consacrée à une présentation du contexte et rappelle les concepts existants qui seront la base du travail. D'abord, le réseau de collaboration (Camarinha-Matos, et al., 2013) est présenté en tant que contexte de l'utilisation de la méthodologie et de l'outil. Le SDA (Camarinha-Matos, et al., 2008) sera une base de la méthodologie MDSEA proposée qui soutiendra la transformation du modèle de concepts de mise en œuvre de la solution informatique.

4.6.2.1 Réseaux Collaboratifs

L'objectif du projet MSEE est de mettre en place un service entre les partenaires qui collaborent à un réseau. Un réseau de collaboration (CN) est un réseau composé d'une variété d'entités (par exemple, des organisations et des personnes) qui sont largement autonomes, répartis géographiquement, et hétérogènes en termes d'environnement d'exploitation, de culture, de capital social et d'objectifs, mais qui collaborent pour atteindre des objectifs communs ou compatibles, et dont les interactions sont prises en charge par des réseaux informatiques (Camarinha-Matos, et al., 2013). Le principal aspect de la discipline des réseaux de collaboration se concentre sur la structure, le comportement et la dynamique évolutive des entités partiellement ou totalement autonomes dans les réseaux. Le contexte de notre étude d'utilisation est donc les CN, mais ne détaille pas les structures des CN. Le travail proposé fournit un support commun pour décrire les interactions (services) entre toutes les structures des partenaires du CN. Mieux encore, il va spécifier l'interface de chorégraphie de l'échange d'informations à définir entre les partenaires. Néanmoins, il est clair que ce

dialogue entre les partenaires dépendra de la structure du CN. La source, le relais de l'information et la cible doivent être identifiés. La plupart des conceptions de service qui fonctionnent réellement se concentrent sur les composants informatiques qui transmettent l'information ; elles peuvent donc conduire à ignorer l'utilisateur, ses compétences et ses exigences pour gérer le service.

4.6.2.2 MDA & MDI dans le Contexte de la Définition de Services

MDA est actuellement l'approche privilégiée pour la modélisation d'entreprise. Cette méthodologie a été présentée précédemment. Elle est également utilisée de manière significative pour la mise en œuvre de services dans les travaux de recherche. Dans la majorité des cas, la dernière étape de la méthode de développement MDA ou autre MD est la génération d'un *Service Oriented Architecture* SOA (Johnson & Brown, 2006) ou une exécution de modèle de Workflow comme BPEL (Orriens, et al., 2003). Néanmoins, le développement est principalement dirigé IT et les modèles sont orientés dès leurs origines dans cet objectif informatique sans placer toujours en position centrale le point de vue et les besoins des utilisateurs.

Pour franchir cette limitation, d'autres travaux ont tenté d'intégrer la vision de l'utilisateur et les problèmes d'interopérabilité à partir du début de la description, par exemple MDI. En effet, la création de modèles depuis la conception jusqu'à la mise en œuvre est une problématique complexe dans les CN en tenant compte des différences pour chaque partenaire et peut conduire à des problèmes d'interopérabilité à chaque niveau de modélisation. MDI est né sur cette déclaration. Il prend en compte précocement l'interopérabilité entre les modèles des entreprises. Il guide ensuite pour garder les modèles interopérables, à chaque niveau d'abstraction, cependant il n'est pas orienté service. D'autres méthodes MD qui tentent de s'adapter au service comme SDA et, plus récemment MDSEA sont présentés ci-après.

4.6.2.3 SDA (Service Driven Architectures)

MDI traite de l'hétérogénéité des partenaires qui conduisent à faire face à des obstacles à l'interopérabilité, mais il n'est pas particulièrement orienté vers le service. Néanmoins, comme mentionné plus haut, la collaboration entre les entreprises MSEE doit être fondée sur la proposition de services pour interfacier les partenaires.

Plusieurs travaux ont été proposés pour donner une ligne directrice pour la définition et la mise en œuvre de service. Les auteurs Camarinha-Matos et al. ont introduit, dans (Camarinha-Matos, et al., 2008), la notion d' « infrastructure plug-and-play inter-entreprises transparente ». Ils ont proposé le cadre de la méthodologie de référence ARCON qui distingue différentes étapes de la modélisation d'entreprise à l'IT. Les auteurs Lin et al. dans (Li, et al., 2009) ont introduit la notion de « Service Driven Architecture » (SDA). Cette approche est plus dédiée à la mise en œuvre de SOA en considérant surtout les contraintes techniques à l'étape de mise en œuvre. En résumé, ce domaine de recherche est étudié par plusieurs initiatives, mais il n'existe pas de consensus clair sur la définition des concepts, la direction de recherche ou les actions à effectuer à ce jour.

Selon (Camarinha-Matos, et al., 2008), la plupart des initiatives matures « *Model Driven* » ont porté uniquement sur des aspects partiels de paramètres de service concrets entre les entreprises, mais ne supportent pas correctement la description de différentes entreprises commerciales et leurs relations dans les écosystèmes d'affaires complexes et en évolution rapide. Le projet ECOLEAD (Camarinha-Matos, et al., 2008), comme une grande initiative internationale, a connu une approche plus holistique considérant à la fois le long terme, l'organisation d'alliances temporaires et la collaboration entre les organisations et les individus. Ils ont considéré que la solution vient d'une interface pour les organisations en

réseau pour être en mesure de définir rapidement et mettre en place des relations avec d'autres organisations, ce qui nécessite une infrastructure *plug-&play-&do* pour les entreprises. Néanmoins, ce projet reconnaît que l'interopérabilité de modélisation est toujours résolue en proposant un même modèle pour toutes les organisations virtuelles et la transformation de modèles d'un niveau d'abstraction à un autre n'est ni automatique ni assistée par un outil.

4.6.2.4 Discussion sur les Approches Dirigées par les « Modèles ou Services »

Une liste des besoins spécifiques a été identifiée pour la création de services dans les entreprises du CN; elle a été confrontée aux résultats obtenus dans MDA, MDI et SDA pour éventuellement prendre les avantages des différents résultats disponibles / prévisibles.

Toutes les approches s'accordent sur le fait qu'une méthodologie orientée services pour la création de l'infrastructure informatique entre CN devrait commencer à partir d'un point de vue indépendant de l'informatique ou au moins d'une plateforme. L'idée proposée dans l'architecture ECOLEAD commence à partir des besoins décisionnels et transforme les modèles au niveau opérationnel. Néanmoins, il ne se concentre pas sur les problèmes d'interopérabilité au niveau des entreprises comme proposés dans MDI. ECOLEAD indique également que le soutien basé sur la norme pour l'interopérabilité entre les services doit être déployé dans les cadres de SOA hétérogènes. Néanmoins, cette question est principalement débattue à partir d'un niveau informatique. Le concept de *plug-&play* inter-entreprises s'inscrit dans les prospectives actuelles des infrastructures. Cependant ce but de normalisation pour l'appui d'une mise en place rapide de l'interopérabilité n'est pas encore atteint par les approches étudiées. La surveillance par la veille technologique des nouvelles technologies (par exemple, SOA, les ontologies, l'Internet du futur, Internet des objets et les nouveaux développements de l'architecture) devrait mettre à jour la méthodologie avec les dernières technologies et formats, et vice versa. Ensuite, le mode d'échange d'informations est de plus en plus distribué et reconfigurable, il ne doit pas reposer sur une vue unique. Les partenaires doivent faire face et s'adapter lorsqu'ils communiquent pour comprendre l'information reçue. L'approche fédérée pour traiter l'information et l'appui de la gestion des ressources doivent être envisagés lorsque la dynamique du système est importante. Pour atteindre cet objectif, la simulation peut être intégrée dans la méthodologie pour valider le scénario d'utilisation du système. Enfin, une meilleure intégration des systèmes existants et la réutilisation des données des entreprises restent des enjeux majeurs. La méthodologie doit donc être réversible, afin de faciliter la réutilisation des systèmes par une approche « Système de Systèmes ».

En conclusion, l'approche Model Driven est essentielle pour permettre la mise en œuvre de services en cohérence avec leur définition au niveau des modèles d'entreprise. MDA définit les niveaux de modélisation et précise les objectifs à atteindre à chaque niveau, mais sans mentionner comment modéliser ou le langage de modélisation à utiliser. L'approche SDA est plus détaillée, mais se concentre principalement sur les aspects informatiques. En outre, les obstacles à l'interopérabilité représentent un enjeu majeur pour le développement de réseaux de collaboration et d'échange de données entre les organisations en réseau, mais ils ne sont pas abordés à tous les niveaux d'abstraction par MDI. Par conséquent, il est nécessaire de développer une approche axée dédiée à définir chaque niveau de modélisation et y associer des langages de modélisation, d'interopérabilité et des mécanismes de transformation d'un niveau à l'autre (Czarnecki & Helsen, 2006). Ce sera l'objectif de cette section ci-après.

4.6.3 Architecture MDSEA : Approches Orientées Service et Interopérabilité

Comme présenté précédemment, lors de la conception du système produit-service, les approches dirigées par les modèles permettent de séparer les préoccupations du point de vue des décideurs de l'entreprise des préoccupations techniques. Néanmoins, ce n'est pas suffisant

pour la création d'un service en CN. Ainsi, la nécessité d'une architecture d'ingénierie qui spécifie un cadre (i.e. une structure conceptuelle) pour les activités d'ingénierie, qui fournit un ensemble de lignes directrices pour structurer les spécifications de services par différents niveaux d'abstraction verticales, mais aussi avec des dimensions horizontales pour traiter les questions d'interopérabilité à chaque niveau d'abstraction est requise.

Le « *Model Driven Engineering Service Architecture* » (MDSEA) est inspiré de MDA / MDI. Cette méthodologie proposée par MSEE a pour premier grand défi de faire évoluer le Service Management Science and Engineering (SSME), qui est générique, vers les systèmes et usines de fabrication du futur. MDSEA fournit une méthodologie intégrée traitant les langages de modélisation à différents niveaux d'abstraction pour soutenir les modèles de service, la conception et enfin la mise en œuvre du système de services. La relation entre les niveaux de modélisation MDSEA (modèle d'affaires du service, modèle indépendant de la technologie et modèle spécifique à une technologie) et les phases du cycle de vie du système de services (exigences utilisateurs, conception et mise en œuvre) est établie. Une des innovations importantes dans MDSEA est de définir l'intégration entre les domaines des composants (IT, Organisation / moyens physiques et humains) au niveau *Business Service Model* (BSM) et de s'assurer que ces aspects de l'intégration seront répartis dans les autres niveaux. En ce sens, cela est donc considéré comme une adaptation et une extension des approches MDA / MDI au contexte de l'ingénierie des services liés aux produits dans l'environnement de l'entreprise virtuelle.

Sur la base de MDA / MDI, le projet MDSEA définit un cadre pour la modélisation du système de services autour de trois niveaux d'abstraction: BSM (*Business Service Model*), TIM (*Technology Independent Model*) et TSM (*Technology Specific Model*) tels que présentés dans la Figure 33. La partie verte représente l'objectif du travail méthodologique effectué dans le cadre de la thèse d'Hassan Bazoun. Le résultat de cette méthodologie sera implémenté dans un outil (SLMToolBox) (Boyé, et al., 2014) permettant d'accompagner la démarche de modélisation.

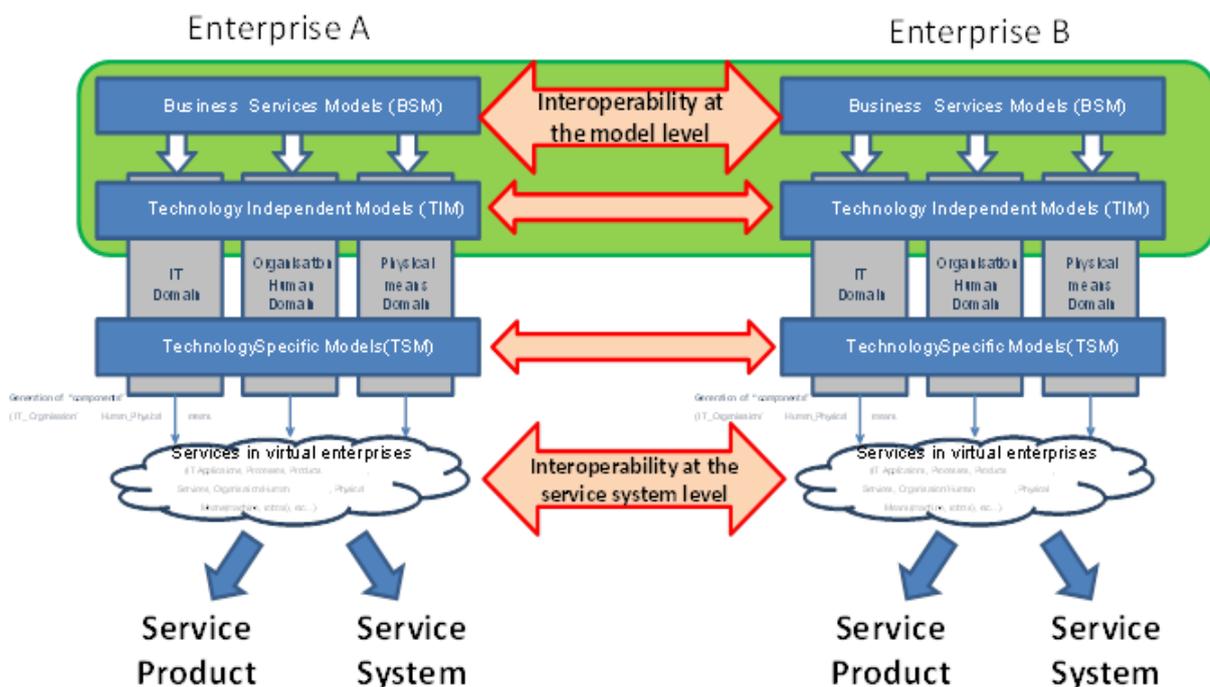


Figure 33. Architecture MDSEA Appliquée à un Réseau de Service de deux Entreprises

Décomposition verticale : (Alignement des décisions d'entreprise et opérationnalisations)

La Figure 33 montre que l'intérêt de cette architecture est d'une part de concevoir et de mettre en œuvre un produit de services et d'autre part de produire le système de services dédié en cohérence avec les modèles de services des entreprises, représentés en utilisant la Modélisation d'Entreprise. En examinant les niveaux TIM et TSM, nous pouvons observer comment la méthodologie différencie trois types de ressources classées en moyens informatiques, humains et physiques. La raison d'une telle catégorisation est de considérer les différentes exigences de ressources à l'étape de mise en œuvre du système de services. Ensuite, l'implication des ressources décrites dans le modèle TSM permet la mise en œuvre du système de services et du produit de services connexes au moyen d'un ensemble de services, à savoir un système dans lequel le prestataire de services (entreprise au sein du réseau) n'est pas toujours identifiée par le client qui se concentre uniquement sur la spécification du service à obtenir. La maintenance des services et les activités de fin de cycle ou recyclage peuvent être assurées par des sociétés différentes dans le réseau sans identification directe par le client. Mais, l'organisation virtuelle conserve les droits de propriété sur les services. Il est important de mentionner que le système de services représenté à chaque niveau de MDSEA reste le même système, mais des contraintes plus ou moins détaillées intègrent progressivement la mise en œuvre.

Alignement horizontal : (Interopérabilité pour la collaboration au sein du réseau de service)

La Figure 33 présente la collaboration entre deux entreprises qui collaborent ensemble afin de produire un service. La collaboration entre les différentes entités peut se produire à différents niveaux d'abstraction de MDSEA (BSM, TIM, et TSM). Les modèles BSM permettent de représenter les modèles des deux entités et d'aligner l'interopérabilité des pratiques en matière de modèles de processus d'affaires et de modèles de décisions. Dans MDSEA, l'interopérabilité est un facteur clé pour la collaboration des entreprises. Les modèles d'entreprise assurent non seulement l'interopérabilité des pratiques, mais aussi des ressources humaines et des systèmes informatiques qui soutiennent ces pratiques. Nous sommes limités à la zone verte dans le cadre de l'étude et de notre participation au projet MSEE.

4.6.3.1 Business Service Model (BSM)

Le niveau BSM spécifie les modèles, au niveau global, décrivant les fonctions du service à l'intérieur d'une même entreprise ou à l'intérieur d'un ensemble d'entreprises ainsi que les liens représentant la coopération entre ces entreprises. Les modèles au niveau BSM doivent être indépendants des futures technologies qui seront utilisées par les différentes ressources et doivent refléter le point de vue de l'entreprise du système de services. En ce sens, il est utile, non seulement comme une aide pour comprendre le problème, mais il joue également un rôle important dans la réduction de l'écart entre la vision des experts du domaine et celle des experts en développement qui bâtiront le système de services. Le niveau BSM permet de définir également le lien entre la production de produits et de la production de services.

4.6.3.2 Technology Independent Model (TIM)

Le niveau TIM offre des modèles à un deuxième niveau d'abstraction toujours indépendant de la technologie utilisée pour mettre en œuvre le système. Il donne des spécifications plus détaillées de la structure et la fonctionnalité du système de services. Plus concrètement, il se concentre sur les détails opérationnels, tout en restant indépendant des détails spécifiques de chaque technologie particulière afin de rester libre du choix de mise en œuvre. Au niveau TIM, la spécification détaillée des composantes d'un système de services est élaborée à l'égard de l'information, l'organisation, les ressources Humaines et Physiques

impliquées dans la production du service. Il est important de mentionner que, par rapport à MDA ou MDI ou SOMA (*Service Oriented Modeling and Architecture*), l'objectif de MDSEA n'est pas seulement orienté IT ; il intègre la représentation des ressources humaines et techniques à partir du niveau BSM. Au niveau TIM, les représentations doivent ajouter des informations de structuration plus détaillées par rapport aux modèles de BSM.

4.6.3.3 Technology Specific Model (TSM)

TSM complète les spécifications du modèle TIM avec les détails techniques de mise en œuvre du système, à savoir comment il va utiliser une technologie spécifique ou un moyen physique (applications informatiques, machine ou personne) pour la prestation de services dans l'interaction avec les clients. Au niveau TSM, les modèles doivent fournir suffisamment de détails pour développer des applications logicielles, des composants matériels, le recrutement des opérateurs / gestionnaires humains ou à établir des plans de formation interne, l'achat ou la réalisation de dispositifs matériels. Comme pour les applications informatiques, un modèle TSM complète un modèle TIM avec des détails technologiques et de constructions qui sont disponibles dans une plateforme de mise en œuvre spécifique, y compris les middleware, les systèmes d'exploitation et langages de programmation (par exemple Java, C++, EJB, CORBA, XML, web Services, etc.). Après les spécifications techniques prises au niveau TSM, la prochaine étape consiste à la mise en œuvre du système de services en termes de composants informatiques (applications et services), des moyens physiques (machines ou appareils, composants de manipulation), et des ressources humaines et de l'organisation assurant les tâches et les opérations humaines connexes.

4.6.4 Langages de Modélisation Proposés

Sur la base des niveaux de modélisation décrits juste auparavant, la méthodologie MDSEA propose d'associer des langages de modélisation pertinents à chaque niveau afin de représenter en confiance le système existant, le produit et le service futurs. Pour atteindre cet objectif, les normes de modélisation des processus gagnent de plus en plus d'importance, ce qui a donné lieu à plusieurs langages et outils de modélisation pour améliorer la représentation des processus de l'entreprise. Pour choisir parmi les langages, le niveau d'abstraction nécessaire est important.

Il est évident que la première étape de spécification d'un service qui doit être établi entre les deux partenaires est cruciale. Au niveau de BSM, le langage de modélisation doit être simple à utiliser, puissant et orienté métier pour être compréhensible par les utilisateurs. En outre, ce (ou ces) langage(s) doit couvrir le processus par des modèles cohérents. Le choix est affecté par la capacité du langage à proposer une décomposition hiérarchique (vue globale et vues détaillées) qui est particulièrement nécessaire à ce niveau. En effet, les décideurs d'entreprise ont souvent une vision globale du fonctionnement du système et doivent pouvoir décrire cette représentation globale avec quelques activités de haut niveau (processus ou décisions). Cette vision globale doit être complétée par des modèles détaillés des activités élaborés par les responsables de différents secteurs de l'entreprise. Ces derniers modèles sont reliés aux modèles de haut niveau de manière hiérarchique et inclusive. Ce sont les principes de la théorie systémique et théorie des systèmes qui doivent être pris en compte dans le choix des langages. Mais il est également évident que le choix de langages de modélisation est aussi subjectif, en fonction de l'expérience des praticiens des langages, de leurs niveaux de diffusion et de leurs reconnaissances au sein des entreprises.

En ce qui concerne la modélisation des processus au niveau (BSM) de l'entreprise, plusieurs langages existent. Le langage Extended Actigram* (EA*), étendu des Actigrammes

avancé de GRAI (Grangel Seguer, et al., 2008), qui était lui-même dérivé de IDEF0 (NIST, 2010), a été choisi pour modéliser les processus au niveau de BSM en raison de son indépendance de l'implémentation, sa décomposition hiérarchique et le fait qu'il peut modéliser trois ressources prises en charge : matérielles, humaines et informatiques. Il a été développé comme une réponse à des questions rencontrées avec les actigrammes étendus GRAI en ce qui concerne l'interopérabilité. Il a l'objectif de capturer des modèles de processus d'affaires à un niveau d'abstraction élevé, indépendamment de toutes spécifications techniques ou détaillées. Il existe par ailleurs, d'autres langages, citons la modélisation orientée service et architecture de M. Bell (Bell, 2008), développée par IBM qui a été prise en compte dans l'étude, mais son orientation IT l'a éloignée de nos exigences.

Au niveau TIM, BPMN 2.0 (OMG, 2011) a été choisi parce que ce langage propose le plus large éventail de concepts de modélisation détaillés. En outre, BPMN permet également de représenter les ressources humaines et techniques qui sont nécessaires dans les principes de représentation de MDSEA. BPMN présente l'avantage de fournir un métamodèle élaboré par l'OMG ce qui facilite sa mise en œuvre. Enfin, il prépare le passage vers les niveaux inférieurs sur l'aspect informatique grâce à son interopérabilité avec de nombreuses plateformes informatiques de BPM permettant ainsi le déploiement et la transformation semi-automatique pour l'exécution des processus BPMN.

Cette section présente l'approche utilisée pour transformer EA* BSM vers BPMN au niveau TIM puis vers DEVS pour la validation de scénarios par simulation. BPMN est utilisé comme colonne vertébrale entre la vue de l'entreprise et le niveau de l'informatique. Les langages ont des considérations et vues différentes sur le système, il est nécessaire d'être en mesure de les lier. Cette section présente une partie des résultats MDSEA, et se concentre sur la transformation de modèles. En détail, les modèles EA* conçus au niveau de BSM doivent être transformés en BPMN 2.0 modèles pour obtenir les modèles de processus métier cohérents au niveau TIM. La section suivante présente un état de l'art dans la transformation de modèles en ce qui concerne nos considérations MDSEA. Ensuite, les mécanismes et les règles de transformation entre BPMN 2.0 et DEVS seront présentés.

4.6.5 Énoncé du Problème sur les Modèles et leur Transformation en MDSEA

Comme mentionné plus tôt, lors de la discussion pour initier une collaboration entre les entreprises, la spécification des services à installer entre les partenaires doit être décrite sans ambiguïté; cette idée doit être maintenue à chaque niveau de la spécification lors de la descente méthodologique pour la mise en œuvre. Dans cet objectif, la définition des processus d'affaires doit fournir une collection de tâches ou d'activités connexes structurées pour produire un service ou un produit spécifique pour un client(s) particulier. C'est « la structure par laquelle une organisation fait ce qui est nécessaire, pour produire des valeurs pour ses clients » (Davenport, 1993). Ces éléments de base y compris les tâches et leurs connexions (c'est à dire leur structure) doivent être préservés et ont besoin de trouver une définition claire à chaque niveau d'abstraction. Des projets antérieurs ont déjà proposé une normalisation de bonnes pratiques qui peuvent être réutilisées (Camarinha-Matos, et al., 2013)

Dans MDSEA les langages de modélisation ont été choisis selon certaines justifications présentées dans la section précédente. La première étape de modélisation qui est effectuée principalement par des utilisateurs non spécialistes de l'informatique est réalisée par une modélisation EA*. La littérature rapporte plusieurs tentatives qui ont essayé de combler l'écart entre les Actigrammes Étendus de GRAI (précurseur de EA*) et d'autres langages de modélisation de processus, tels que BPMN. Par exemple, dans le projet ASICOM (Xinxin, 2011), dont l'objectif était de construire une plateforme qui permet l'interopérabilité entre des

partenaires industriels, la transformation de modèle a été considérée comme une solution clé pour les questions d'interopérabilité. Dans le cadre de ce projet, les transformations de modèles Actigrammes Etendus (EA) GRAI en diagrammes UML d'activité (Ben Salem, et al., 2008) et en modèles BPMN ont été testées et évaluées. Cependant, ce travail a rencontré des blocages. Tout d'abord, la version initiale des Actigrammes Etendus GRAI n'était pas conçue pour une approche MDA et a imposé des limites à la transformation des modèles générés depuis ce langage. De plus, la spécification des Actigrammes Etendus GRAI n'était pas suffisamment formelle pour permettre la transformation. Des métamodèles ont été depuis initiés dans le cadre des projets de recherches universitaires ASICOM, ISTA3 et MSEE. Les projets convergent à présent vers une version étendue : Actigrammes Etendus (EA*) dont le métamodèle est spécifié dans les travaux présentés. EA* est notre modèle source.

Nous devons définir ensuite des règles de transformation vers le modèle cible BPMN. Cependant la littérature rapporte peu de travaux sur les transformations « *X to BPMN* ». Il semble que la majorité des travaux traite de la transformation qui commence depuis BPMN, où la préoccupation principale est la prise en compte des informations plutôt que le point de vue utilisateur et ses actions sur le processus. Un rare exemple de transformation du langage EPC vers BPMN (Tscheschner, 2010) peut être cité. Ici l'EPC est un langage spécifique pour SAP, qui trouve dans BPMN une occasion d'avoir un public plus large et une certaine interopérabilité. Peu de travaux indiquent que BPMN est déjà une vision TI du problème. La plupart des travaux commence par BPMN comme entrée pour descendre vers l'exécution, par exemple, avec BPEL. D'autres travaux proposent l'ingénierie inverse de retour vers BPMN à partir du code. En conclusion, la transformation d'EA* à BPMN n'a pas été décrite et automatisée précédemment mais est nécessaire pour MDSEA. Ce champ vide de recherche a été investi dans le cadre du projet MSEE et il est l'objet de la première partie de cette section.

La section suivante présente la version améliorée des Actigrammes Etendus GRAI intitulée Extended Actigram*. Il définit les bases d'une transformation des modèles EA* vers les modèles BPMN 2.0, et met en évidence le passage d'un niveau d'abstraction à un autre (BSM TIM) à travers une transformation semi-automatique ou automatique dans le cadre de l'approche MDSEA. Il termine enfin par la mise en œuvre de ces concepts dans la réalisation de l'outil SLMToolBox (Boyé, et al., 2014). Un exemple est proposé pour illustrer la définition de services dans un marché électronique afin de valider l'utilisation de cet outil.

4.6.6 Transformation EA* vers BPMN

Le domaine de la transformation de modèles fournit des moyens techniques pour produire des modèles cibles à partir d'un certain nombre de modèles sources (Bézivin, et al., 2005). A cet effet, ces moyens permettent de définir comment les éléments du modèle source doivent être adaptés afin d'initialiser les éléments du modèle cible. Cette section présente les grands principes de la transformation d'un modèle EA* dans un modèle BPMN. Cela comprend la présentation du cadre de transformation, le langage de transformation utilisé pour mettre en œuvre cette cartographie, l'architecture de transformation et les tableaux de mappage des concepts EA* en concepts BPMN 2.0.

4.6.6.1 Extended Actigram Star (EA*)

L'objectif principal de Actigram Étendu Star (EA*) (Ducq, et al., 2004) est de fournir une notation graphique commune et explicite pour la modélisation des processus d'affaires. Un tel langage est destiné aux gens d'affaires, qui ont besoin de décrire et de communiquer les processus d'affaires de haut niveau portant sur les ressources des entreprises avec l'aide d'un formalisme simple et explicite. En comparaison à d'autres initiatives telles que BPMN2.0,

EA* s'appuie sur un ensemble réduit d'objets graphiques et se concentre sur les aspects « métier » des processus de l'entreprise. La syntaxe accessible de EA* facilite la conception de processus d'affaires.

Ce langage de modélisation prend ses origines dans la méthodologie GRAI (Chen, et al., 1997) pour la modélisation d'entreprise et l'analyse « centrée décision ». La méthodologie GRAI comprend l'« Actigram GRAI étendu », langage original de modélisation des processus d'affaires (sur la base de concepts d'IDEFO, dans le domaine de l'ingénierie de système). Le travail effectué sur EA* a consisté à réorganiser le langage original avec l'ajout d'un « métamodèle » d'architecture et l'amélioration de la facilité d'utilisation dans le domaine des services (voir MDSEA) et son interopérabilité avec d'autres formalismes (e.g. BPMN).

EA* facilite ainsi la modélisation des processus d'affaires dans une entreprise offrant une vue évolutive du processus modélisé. Il s'adresse aux utilisateurs responsables de la création des premiers modèles : les décideurs d'affaires, les gestionnaires de processus, et les développeurs techniques chargés de l'élaboration d'outils depuis la modélisation des processus métier. Comme un langage de modélisation graphique, EA* offre aux utilisateurs de visualiser graphiquement les processus d'affaires de manière normalisée et compréhensible. Ainsi, EA* doit être considéré comme une nouvelle version, plus formelle et aboutie, des Actigrammes Etendus GRAI. En outre, il ajoute de nouveaux concepts afin de faciliter l'abstraction, la manipulation et la transformation de modèle.

4.6.6.2 Modèle Conceptuel

Le modèle conceptuel est formé de plusieurs niveaux qui permettent de généraliser les concepts et réduire et factoriser les détails dans la Figure 34.

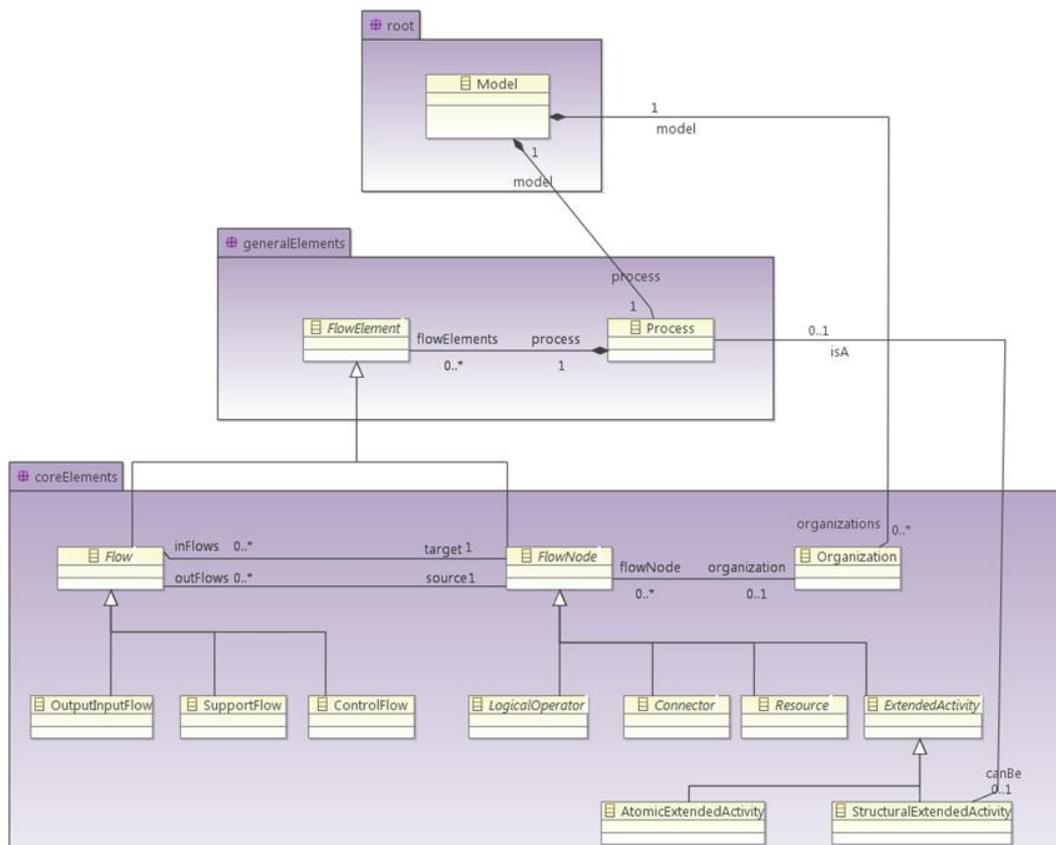


Figure 34. Modèle de Données Conceptuel de EA*

Les éléments EA * sont divisés en trois sous-paquetages :

- **Root package** (Paquet de Racine) : contient l'élément racine de EA* (Modèle)
- **General Elements package** (Paquet Eléments Généraux) : présente les éléments concrets du langage sans détails.
- **Core Elements package** (Ensemble des Eléments de Base de EA*) : contient les éléments du diagramme, élément associé à un graphique.

Chaque éléments d'EA* hérite Figure 35 de 3 attributs de *BaseElement* : **id**, **name**, et **code**.

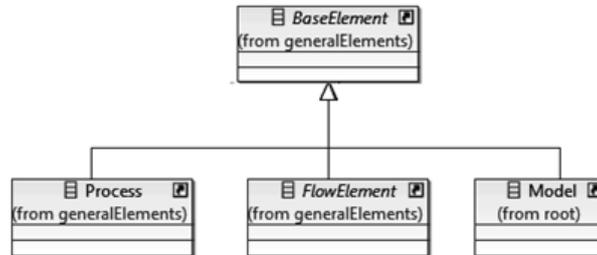


Figure 35. Structure de Données de *BaseElement*

Le diagramme EA* est une représentation d'un processus de travail. Un processus est composé de *FlowElement*(s), qui sont une représentation abstraite de l'ensemble des éléments constituant le diagramme. Un **FlowElement** peut être un :

- **Flow:** utilisé pour relier les *FlowNodes*. Un flux est dirigé et peut être un *OutputInputFlow*, *ControlFlow* ou *SupportFlow*. Plusieurs contraintes régissent la connexion d'un flux, en fonction de sa nature et du type de ses nœuds source et cible. Un flux a une source et une cible
 - *OutputInputFlow*: représente la séquence logique entre deux éléments.
 - *ControlFlow*: ce flux porte l'ordre de réalisation d'un *ExtendedActivity*
 - *SupportFlow*: indique que le flux soutient la réalisation d'un *ExtendedActivity*. Chaque instance d'une *SupportFlow* qui n'est pas une ressource matérielle, a un « rôle de ressource » qui peut être « responsable » ou « participe ».
- **FlowNode:** représentation abstraite des éléments du diagramme des flux reliés entre eux. Un **FlowNode** est une super classe de quatre autres catégories :
 - **ExtendedActivity:** cela représente l'unité fonctionnelle d'un processus. Une activité prolongée peut être décomposée en plusieurs activités. Dans ce cas, il est appelé «*StructuralExtendedActivity*. Une activité qui n'a pas été ventilée sera appelée «*AtomicExtendedActivity*». En outre, une activité étendue définie « à partir de » ou « fin », démontrant le début/fin de processus.
 - **Organization:** permet de représenter les organisations participant à la réalisation d'un processus. Une organisation est responsable pour *FlowNodes* spécifiques dans un processus.
 - **Resource:** un concept abstrait représentant les ressources utilisées par un processus de soutien à une ou plusieurs activités. Il peut être de trois types : humaines, matérielles et informatiques.
 - **Connector:** utilisé pour représenter l'origine ou la destination d'un flux lorsque l'origine ou la destination est à l'extérieur du schéma actuel. Les rôles possibles sont: *processconnector*, *internalconnector*, *externalconnector*. Une classe de *ProcessConnector* pointe alors vers le processus extérieur au schéma.
 - **Logical Operator:** cela représente une convergence ou une divergence de flux multiples. Il existe quatre types d'opérateurs logiques: *ConvergingAnd*, *DivergingAnd*, *ConvergingOr*, et *DivergingOr*.

4.6.6.3 Sémantique Statique

La sémantique statique définit les règles qui régissent les relations entre classes.

« Flow Constraints »:

Dans EA *, les contraintes sur les flux, le type de la source et la cible sont définis. Pour représenter ces contraintes:

- Les annotations textuelles peuvent provenir du métamodèle UML en conception.
- *L'Object Constraint Language* OCL (OMG, 2012) peut être utilisé lors de la conception et du niveau de mise en œuvre.

Le Tableau 6 résume les règles d'utilisation de flux, en fonction des nœuds cible / source.

Tableau 6. *Contraintes de Flux (Flow Constraints)*

| <i>Source</i> | <i>Target</i> | <i>ExtendedActivity</i> | <i>LogicalOperator</i> | <i>Resource</i> | <i>Connector</i> |
|--------------------------|---------------|--|------------------------|-----------------|------------------|
| Extended Activity | | OutputInputFlow(trigger) ControlFlow (trigger) SupportFlow | OutputInputFlow | N.A. | OutputInputFlow |
| Logical Operator | | OutputInputFlow(trigger) ControlFlow (trigger) | OutputInputFlow | N.A. | OutputInputFlow |
| Resource | | SupportFlow | N.A. | N.A. | N.A. |
| Connector | | OutputInputFlow (trigger) ControlFlow (trigger) | OutputInputFlow | N.A. | N.A. |

N.A. = Not Applicable (Trigger) = is an optional characteristic of a flow.

Caractéristique de déclenchement:

Un flux peut déclencher une activité étendue, ce qui signifie qu'une activité étendue attendra le flux afin de commencer sa mission et à fonctionner. Cette caractéristique de déclenchement est soumise à des contraintes en fonction de la source, la cible et le type. La cible du flux doit être un ExtendedActivity. Le flux doit être un OutputInputFlow ou un ControlFlow. Un SupportFlow ne peut pas être un flux de déclenchement.

4.6.6.4 Architecture de Transformation

L'objectif est de transformer un modèle EA * dans un modèle cible BPMN. Une des techniques les plus utilisées de transformation est l'« approche métamodèle » (Bourey, et al., 2007) (Bourey, 2011). La Figure 36 particularise l'approche « métamodèle » dans le contexte de la transformation de EA * modèles en modèles BPMN 2.0.

La première étape consiste à identifier les métamodèles sources et cibles (respectivement métamodèle EA * et métamodèle BPMN2.0), et les langages utilisés pour la représentation du modèle. Le métamodèle Ecore (McNeill, 2012) est utilisé comme un méta-métamodèle qui définit les structures de l'EA * et métamodèles de BPMN 2.0. Les deux métamodèles EA * et BPMN2.0 sont définis dans Ecore. En outre (XML Metadata Interchange XMI) (OMG, 2000) est utilisée pour enregistrer modèles sources et cibles.

Après avoir défini les métamodèles et la description des langages du modèle, une correspondance entre métamodèles est construite. Ce mappage est défini dans un tableau de correspondance de constructions. Les règles de correspondance décrites dans le tableau sont mises en œuvre à l'aide de l'Atlas Transformation Langue (ATL) (Jouault, et al., 2008).

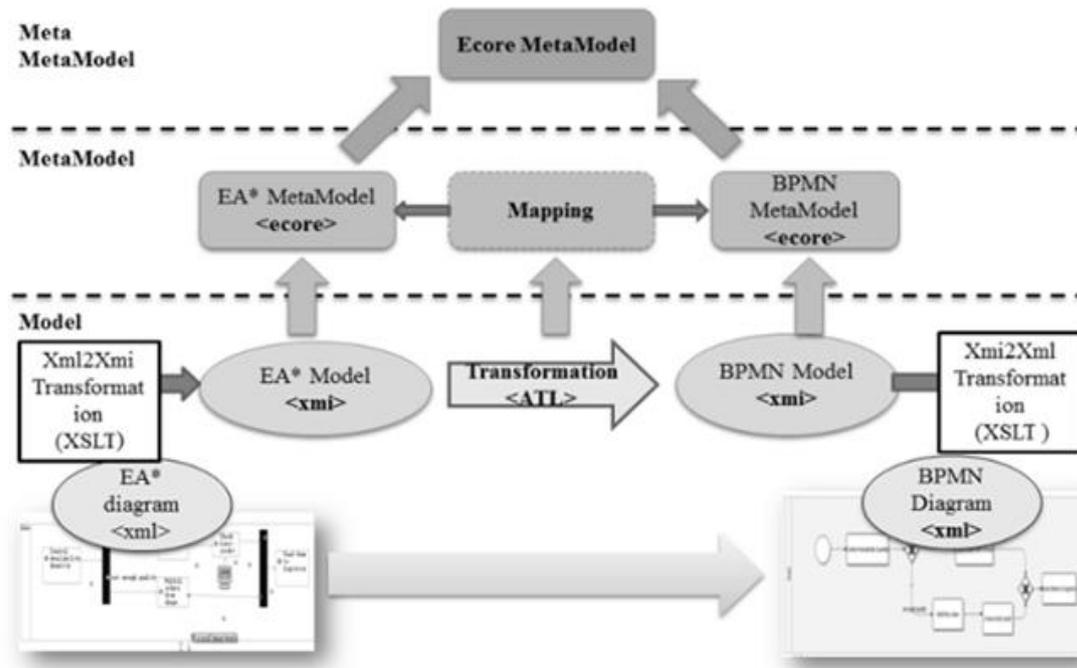


Figure 36. Architecture de Transformation de EA* vers BPMN

Le plugin Eclipse « modeleur BPMN » (Eclipse_Foundation, 2012) est utilisé pour visualiser et valider des modèles de cibles BPMN. Il est nécessaire de définir le format XML d'un des éléments graphiques spécifiques (OMG, 2011). Pour résoudre ce problème, nous nous appuyons sur le mécanisme XSLT (Tidwell, 2008) pour retransformer les modèles BPMN (format XMI) résultants d'ATL en XML conforme à l'exigence BPMN Ecore.

4.6.6.5 Mappage de Concepts

Le mappage (« *mapping* ») des concepts proposés pour la transformation crée des correspondances et des liens entre les concepts et leurs relations d'EA* au langage BPMN. Il s'agit d'une traduction des constructions et des relations d'un métamodèle à l'autre. En conséquence, une analyse approfondie et la compréhension des métamodèles d'EA* et BPMN, représentent la principale clé pour démarrer la traduction et en tirer les liens. Le Tableau 7 résume le mappage des concepts d'EA* en concepts BPMN. Le mappage est assorti de conditions qui régissent la création de relations entre concepts.

4.6.6.5.1 Atomic ExtendedActivity

Contrairement à l'ExtendedActivity « structurelle », plusieurs conditions régissent le mappage d'ExtendedActivity « atomique ». Les conditions varient en fonction des ressource(s) soutenant l'ExtendedActivity.

Condition1: Une ressource humaine est responsable de la réalisation de l'activité prolongée. Dans ce cas, l'activité prolongée atomique est associée à un UserTask.

Condition2: Une ressource informatique est responsable de la réalisation de l'activité prolongée. Dans ce cas, l'activité prolongée atomique est associée à un ServiceTask.

4.6.6.5.2 Resource

Une ressource matérielle est associée à un objet de données. Le mappage des ressources humaines et informatiques dépend du *resourceRole* associé au *SupportFlow* le reliant à l'ExtendedActivity. Une ressource EA* pourra générer des *pool* ou *lane* séparées en BPMN.

Condition1: La valeur de *resourceRole* est « chargé de ». Dans ce cas, la ressource (humaine ou IT) est mappée sur une voie, dans laquelle le *ExtendedActivity* soutenue appartient au flux.

Condition2: la valeur de la *resourceRole* est « participe à ». Dans ce cas, la ressource (humaine ou informatique) est ajoutée à la liste des ressources pour la *ExtendedActivity* supportée.

4.6.6.5.3 ControlFlow

La mise en correspondance d'un ControlFlow dépend du type de source et de cible relié par le flux.

Condition1: La source est un *ExternalConnector* ou *InternalConnector* et la cible est un *ExtendedActivity* « atomique ». Dans ce cas, il est mappé à un *MessageFlow*.

Condition2: La source est un *ExternalConnector* ou *InternalConnector* et la cible est un *ExtendedActivity* « structurelle » Cette relation « 1 à n », mappe un *ControlFlow* à une combinaison de *MessageFlow*, *MessageEvent*, et *SequenceFlow*.

Condition3: La source et la cible sont des *ExtendedActivity* ou des *LogicalOperator* utilisant des ressources différentes. Cette situation génère des *MessageFlow*, *MessageEvent*, et *SequenceFlow* et des *pool* ou *lane* correspondantes aux ressources indépendantes.

Condition4: La source est un *ProcessConnector* ou *ExtendedActivity*. Cette relation « 1 à n », mappe un *controlFlow* à une combinaison de *DataObject* et *Associations*.

4.6.6.5.4 OutputInputFlow

La mise en correspondance d'un OutputInputFlow dépend du type de source et de cible relié par le flux.

Condition1: La source est un *ExternalConnector* ou *InternalConnector* et la cible est une *ExtendedActivity* atomique. Dans ce cas, le « OutputInput » Flow est associé à un *MessageFlow*.

Condition2: La source est un *ExternalConnector* ou *InternalConnector* et la cible est une *ExtendedActivity* structurelle ou *LogicalOperator*. C'est une relation « 1 à n », où le *controlFlow* est mappé à une combinaison de *MessageFlow*, *MessageEvent*, et un *SequenceFlow*.

Condition3: La source est un *ProcessConnector*, *ExtendedActivity*, ou *LogicalOperator* et la cible est également l'une de ces trois options. Dans ce cas, il est mappé à *SequenceFlow*.

Condition4: La source est une *ExtendedActivity* structurelle ou *LogicalOperator*, et la cible est un *ExternalConnector* ou *InternalConnector*. C'est une relation « 1 à n », où le *controlFlow* est mappé à une combinaison de *MessageFlow*, *MessageEvent*, et un *SequenceFlow*.

Condition5: La source est une *ExtendedActivity* atomique et la cible est un *ExternalConnector* ou *InternalConnector*. Dans ce cas, il est mappé à un *MessageFlow*.

4.6.6.5.5 SupportFlow

Le mappage d'un flux de type « Support » dépend du type de la source.

Condition1: La source est une ressource Matérielle. Dans ce cas, elle est mappée à une association.

4.6.6.6 Langage de Transformation de Modèle

Cette section présente ATL, le langage de transformation qui met en œuvre les concepts de mappage (Tableau 7).

ATL est un langage de transformation de modèles spécifié à la fois comme un métamodèle et une syntaxe concrète textuelle. Dans le domaine de l'ingénierie dirigée par les modèles (MDE), ATL fournit aux développeurs un moyen de spécifier la façon de produire un certain nombre de modèles de cibles à partir d'un ensemble de modèles de sources.

Le langage ATL est un hybride de la programmation déclarative et impérative. Le style préféré de la rédaction de transformation est déclaratif: il permet d’exprimer simplement les correspondances entre les éléments source et modèle de cible. Cependant, ATL fournit également des constructions impératives afin de faciliter la spécification des mappages qui peuvent difficilement être exprimés de manière déclarative. Un programme de transformation ATL est composé de règles qui définissent la manière dont les éléments du modèle source sont adaptés et ont navigué pour créer et initialiser les éléments des modèles cibles. Outre les transformations de modèles de base, ATL définit un modèle outil de consultation supplémentaire qui permet de spécifier des demandes sur des modèles. ATL permet également le code factorisation par la définition des bibliothèques ATL.

La Tableau 7 définit les types de règles ATL utilisés pour transformer une modèle EA* en un modèle BPMN. Ces règles sont détaillées ci-après.

Tableau 7. Table de Mappage EA* vers BPMN 2.0

| EA* | Condition | BPMN 2.0 |
|----------------------------|--|---|
| Model | | Definitions |
| Process | | Pool, Process, and Participant |
| StructuralExtendedActivity | | Sub Process |
| AtomicExtendedActivity | It is supported by Human | UserTask |
| | It is supported by IT (no human interaction) | ServiceTask |
| LogicalOperator | DivergingOr | Diverging Exclusive Gateway |
| | ConvergingOr | Converging Exclusive Gateway |
| | DivergingAnd | Parallel Gateway |
| | ConvergingAnd | Parallel gateway |
| Organization | | Lane |
| MaterialResource | | Data Object |
| HumanResource | Responsible for | Lane |
| | Participates in | Resource (added to the list of resources of a task) |
| ITResource | Responsible for | Lane |
| | Participates in | Resource (added to the list of resources of a task) |
| ControlFlow | If the source is an ExternalConnector or InternalConnector and target is an “atomic” ExtendedActivity | MessageFlow |
| | If source is an ExternalConnector or InternalConnector and target is a “structural” ExtendedActivity | Catching Message Event, Message flow, and Sequence Flow + Pool, Process, and Participant |
| | If source and target are ExtendedActivity or LogicalOperator with ≠ resources | Throwing Message Event, Message flow, Catching Message Event and Sequence Flow + Pool, Process, and Participant |
| | If the source is a ProcessConnector or ExtendedActivity | DataObject, and associations |
| OutputInputFlow | If the source is an ExternalConnector or InternalConnector (and target is an atomic Extended Activity) | MessageFlow |
| | If the source is an ExternalConnector or InternalConnector (and target is a structural Extended Activity or LogicalOperator) | Catching Message Event, Message Flow, and Sequence Flow |
| | If the source is a ProcessConnector, ExtendedActivity, or LogicalOperator (and target is an ExtendedActivity or process connector or logical operator) | SequenceFlow |
| | If the source is a structural ExtendedActivity or logical operator (and target is an ExternalConnector or InternalConnector) | Throwing Message Event, Message Flow, Sequence Flow |
| | If the source is an atomic ExtendedActivity (and target is an External or Internal Connector) | MessageFlow |
| SupportFlow | If source is a Material resource | association |
| ExternalConnector | | Pool, Process, and Participant (Black BOX) |
| ProcessConnector | | Call Activity |
| InternalConnector | | Pool, Process, and Participant (Black BOX) |

4.6.6.7 Règles de Matching

Le mécanisme de règle correspondante ATL fournit aux développeurs d'ATL un moyen pratique de spécifier la manière dont les éléments du modèle cible doivent être générés à partir des éléments du modèle source. Un exemple est donné dans la Figure 37.

```
rule ExtendedActigramToDefinition {
  from
    s: EA!Model
  to
    a: BPMN!Definitions (
      id <- s.name,
      targetNamespace <- 'http://www.jboss.org/drools',
      expressionLanguage <- 'http://www.mvel.org/2.0',
      typeLanguage <- 'http://www.java.com/javaTypes',
      rootElements <- s.process.flowElements -> select(e | e.
        oclIsTypeOf(EA!ExternalConnector) or e.
        oclIsTypeOf(EA!InternalConnector)) -> collect(e | thisModule.
        InExternalConnector2Process(e)).
      insertAt(1, thisModule.ProcessToProcess(s.process)).
      append(thisModule.collaborations)
    )
}
```

Figure 37. Matched Rule

La règle « ExtendedActigramToDefinition » transforme les éléments racine du modèle EA* en l'élément racine BPMN2.0 « Definitions ».

4.6.6.7.1 Lazy rules

Les « Lazy Rules » sont des règles adaptées, mais ne sont appliquées que lorsqu'elles sont appelées par une autre règle (Figure 38).

```
lazy rule ProcessToProcess {
  from
    s: EA!Process (
      s.oclIsTypeOf(EA!Process)
    )
  to
    a: BPMN!Process (
      id <- s.id,
      name <- s.name,
      flowElements <- s.flowElements.
      append(thisModule.createUserTasks(thisModule.getActivities_HumanRes(s.flowElements ->
        select (e|e.oclIsTypeOf(EA!SupportFlow))))).
      append(thisModule.createServiceTasks(thisModule.getActivities_ITRes(s.flowElements ->
        select (e|e.oclIsTypeOf(EA!SupportFlow))))
        .append(s.flowElements -> select (e| e.oclIsTypeOf(EA!Or))-> collect (e|
        thisModule.Or2ExclusiveGateway(e))
        .append(s.flowElements -> select (e| e.oclIsTypeOf(EA!And))-> collect (e|
        thisModule.And2ParallelGateway(e))
        .append(s.flowElements -> select (e| e.oclIsTypeOf(EA!MaterialResource)) ->
        collect (e| thisModule.Material2DataObject(e))
        .append(s.flowElements -> select (e| e.oclIsTypeOf(EA!ProcessConnector)) ->
        collect (e| thisModule.ProcessConnector2CallActivity(e))),
        laneSets <- thisModule.laneSet
    )
    do{
      let s: String = '' in a.name.toString().println();
      thisModule.bpmnProcess <- a;
      thisModule.bpmnProcess.flowElements <-
      thisModule.bpmnProcess.flowElements.union(thisModule.bpmnFlowElements);
      thisModule.bpmnProcessRef <- a;
      thisModule.eaStarProcessRef <- s;
      thisModule.collaborations.participants <-
      thisModule.collaborations.participants.prepend(thisModule.ProcessToParticipant(a));
      thisModule.laneSet.lanes <-
      thisModule.laneSet.lanes.union(thisModule.createLanes(thisModule.getResponsibleResources(s.flowElements ->
        select (e| e.oclIsTypeOf(EA!SupportFlow)))));
    }
}
```

Figure 38. Lazy Rule

La règle « *Process2Process* » va transformer un élément spécifique de EA* en un élément BPMN. Dans cette règle, des « *Lazy* » règles sont appelées sur des éléments EA* spécifiques.

4.6.6.7.2 Règles Appelées (Called Rules)

ATL définit un type supplémentaire de règles permettant de générer explicitement des éléments du modèle cible du code impératif. Sauf pour le point d'entrée appelé règle, ce genre de règles doit être appelé explicitement à partir d'un bloc impératif ATL (Figure 39).

```
entrypoint rule CreateCollaboration() {
  to
    a: BPMN!Collaboration (
      name <- 'collaboration',
      id <- 'collaboration_1'
    ),
    b: BPMN!LaneSet(
      name <- 'laneSet',
      id <- 'laneSet_1'
    ),
    c: BPMN!Process(
      name <- 'ProcessToStoreFlowElements',
      id <- 'processStore'
    )
  do {
    thisModule.collaborations <- a ;
    thisModule.laneSet <- b ;
    thisModule.bpmnFlowElements <- c.flowElements;
  }
}
```

Figure 39. Called Rule

La règle de *CreateCollaboration* est implicitement invoquée en début de transformation. Il crée un élément « *collaboration* », un *LaneSet* qui représente un conteneur pour les BPMN *Lanes*, et un processus BPMN qui initialise le récipient BPMN *FlowElements*.

4.6.6.7.3 Helpers

Les aides ATL peuvent être considérées comme l'équivalent ATL des méthodes en programmation objet. Elles permettent de définir le code ATL factorisé qui peut être appelé à partir de différents points d'une transformation ATL (Figure 40).

```
helper def: getActivities_ITRes(eaFlows : Set(EA!SupportFlow)): Set(EA!ExtendedActivity) =
  eaFlows -> select (e | e.source.ocliIsTypeOf(EA!ITResource) and
  e.resourceRole.toString().startsWith('res')) -> collect (e | e.target).asSet();
```

Figure 40. Helper

Les « *getActivities_ITRes* » helper prennent en entrée un ensemble de flux de support et renvoie un ensemble de *ExtendedActivities* pris en charge par une ressource informatique.

4.6.6.8 Principe d'Implémentation

Hassan Bazoun dans le cadre de son implication dans MSEE dans la société (Hardis, 2012) a développé un outil de modélisation (SLMToolBox) visant la gestion du cycle de vie du service, en mettant en œuvre plusieurs éditeurs de modélisation (EA*, BPMN et DEVS), et des installations de transformation de modèles (comme la transformation d'EA* modèles dans les modèles de BPMN2.0). En particulier, l'outil a mis en place la transformation du modèle décrit ci-dessous. D'un point de vue technique, cet outil utilise des composants graphiques Eclipse pour proposer aux utilisateurs une palette d'objets graphiques.

4.6.6.9 Etude de Cas

Le projet MSEE vise à proposer une plateforme de services disponibles pour un écosystème de partenaires collaborateurs. Cette étude de cas combine plusieurs services typiques rencontrés dans le projet MSEE. Pour des raisons de confidentialité ce cas ne propose pas directement un dossier complet du projet, mais décline une situation typique dans MSEE pour illustrer la transformation de modèles qui est au cœur des préoccupations de cette section. L'étude de cas est une place de marché électronique avec des partenaires de collaboration.

Le concept de marché électronique (e-marché, en anglais *e-Market Place*) a été fondé sur le regroupement des produits nouveaux et/ou utilisés provenant de plusieurs vendeurs sur une plateforme Internet unique et sous le même catalogue e-commerce. Il faut supposer que c'est uniquement une plateforme de trading (seulement un intermédiaire). L'e-marché ne peut pas vendre ni acheter directement des produits physiques ou services échangés sur la plateforme. D'une part, les marchés électroniques proposent des places aux fournisseurs sous la forme de plateformes Internet B2B. D'autre part, les marchés électroniques offrent un portail pour l'interface B2C. Plusieurs entreprises ont saisi cette occasion pour étendre leur offre. En France, les principales plateformes d'e-commerce s'étendent pour intégrer progressivement dans leurs portails cette offre de service. Citons en particulier les entreprises : *CDiscount, Rue du Commerce, La Redoute, Brandalley, et PixMania*, etc. qui ont initié cette reconfiguration « e-marché » depuis 2010. Ce concept de vente correspond à l'orientation services. Il propose deux interfaces de service, l'une dédiée aux vendeurs et l'autre aux clients. Des services dédiés peuvent être fournis. Du côté B2B, le réseau de collaboration est une question clé. Par exemple, les algorithmes de visibilité dans les marchés favorisent les commerçants qui sont présents depuis longtemps. Coté client, des outils permettent de comparer et de mieux évaluer la livraison à faible coût, la satisfaction client, etc. Une solution d'exportation de catalogue de produits est embarquée sur certains marchés pour une stratégie gagnant/gagnant. Le vendeur peut ainsi réutiliser son catalogue et faire partie de plusieurs marchés.

L'étude de cas présentée dans cette section décrit un des processus réalisés dans un réseau e-marché collaboratif. Il détaille le processus d'achat des produits à l'aide d'un site web sur le marché. Le marché est maintenu par un agent courtier qui offre des services pour les clients qui choisissent une configuration et achètent leurs produits en ligne. Les vendeurs ciblent les clients pour vendre leurs produits par l'intermédiaire du courtier. En conséquence, un réseau de collaboration, formé du site courtier, des vendeurs, et des sociétés de livraison, offre un service à la clientèle en ligne. Le but de cette section est de démontrer l'appui fourni par l'outil décrit précédemment. Le modèle d'affaires est assisté dans sa transformation pour générer la plateforme de service qui sera ensuite mise en œuvre.

L'exemple qui suit est un modèle de processus de marché électronique de vente privée et d'achat qui a été modélisé et transformé en utilisant la *SLMToolBox*. Il formalise les considérations commerciales capturées avec le langage EA* (Figure 41). Puis, afin de préparer la définition de la plateforme électronique, la *SLMToolbox* a transformé le modèle en diagramme BPMN 2.0 (Figure 42) selon la règle décrite dans la section précédente. Dans ce modèle, nous représentons un client qui se connecte à son compte utilisateur, navigue parmi les marques disponibles, choisit une marque, navigue parmi les produits disponibles de la marque, et configure le produit qu'il souhaite acheter (couleur, taille, etc.). Lorsque le client met fin à la configuration, l'agent courtier vérifie les détails de disponibilité et de livraison du produits de la société vendeuse. Ces détails seront transférés au client, qui décidera de valider son panier ou pas. Ensuite, il peut payer pour ses produits ou retourner choisir d'autres produits.

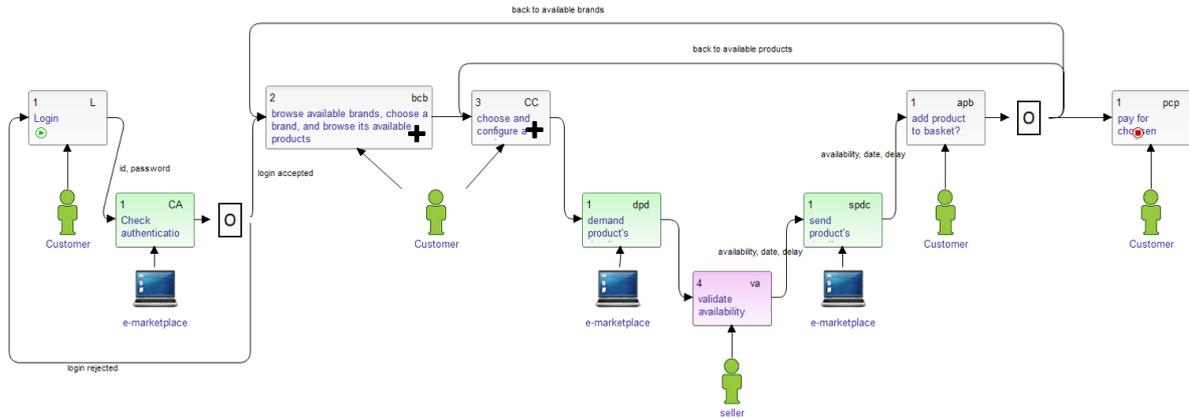


Figure 41. *Processus d'Achat d'un E-Marketplace en EA**

Les résultats montrent que la transformation SLMToolBox a été en mesure d'identifier les partenaires et d'isoler les services qu'ils sollicitent. Dans le modèle BPMN Figure 42 les couloirs sur le niveau supérieur représentent la liaison de B2C et le service nécessaire. Sur la partie inférieure les couloirs représentent le réseau de collaboration au sein d'une relation B2B où une compétition s'effectue entre les vendeurs pour fournir la meilleure proposition à la demande du client (par exemple sur le délai de livraison et le prix).

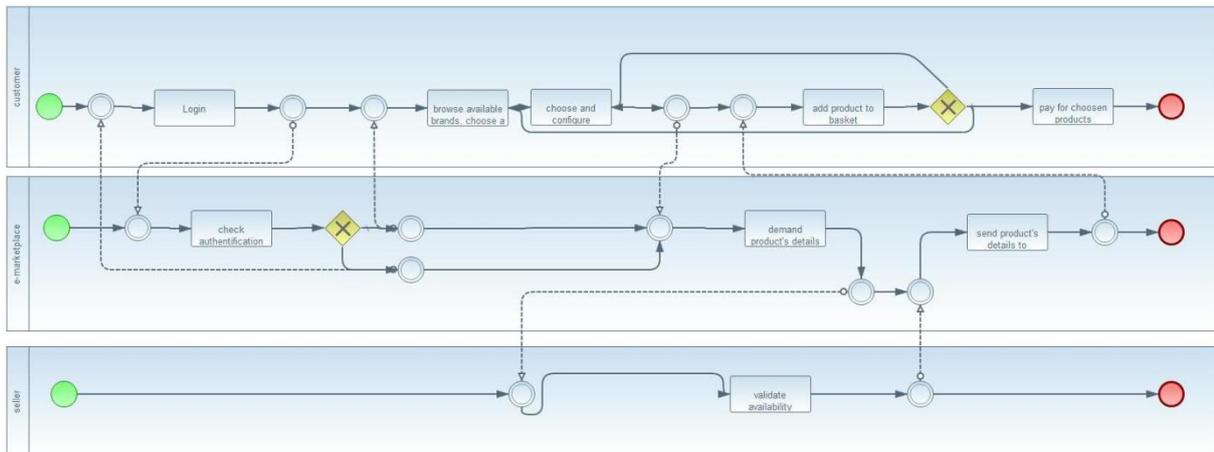


Figure 42. *Processus d'Achat d'un E-Marketplace en BPMN*

L'objectif étant de détailler le système de services à mettre en place entre les partenaires et d'identifier le produit de service à échanger entre eux. La séquence d'action est clairement définie dans un modèle BPMN sans ambiguïté. Le type de données à échanger et la synchronisation des partenaires dans le flux de processus sont identifiés. Ils peuvent être utilisés pour faire fonctionner un système ERP ou orchestrer le processus des services entre les partenaires du réseau collaboratif. Néanmoins, la transformation du diagramme EA* vers BPMN, constitue un passage du niveau de BSM bas vers le niveau TIM haut. En conséquence, le schéma BPMN obtenu doit être enrichi au niveau TIM haut pour satisfaire les exigences plus spécifiques de ce niveau d'abstraction. Même si l'outil prépare les objets à manipuler, la nouvelle structure manque d'informations techniques qui viendront des contraintes logicielles et matérielles de niveau inférieur. L'enrichissement sémantique des

concepts ne peut être fait complètement automatiquement. Ceci pourra être utilisé comme une étape préalable avant l'application des définitions SOA au niveau TSM de MDSEA en utilisant par exemple BPEL. Dans ces phases ultérieures le modèle BPMN pourra être enrichi de données techniques pour satisfaire à l'exigence du niveau TSM décrite dans la Figure 41.

Un retour d'expérience concret de ce travail a été obtenu dans le projet MSEE. L'intérêt réel a été validé par des utilisateurs de modèles MSEE lors de la transformation de leurs modèles de hauts niveaux EA* vers l'implémentation de services. En particulier, l'outil a été reconnu pour lever les ambiguïtés, isoler et caractériser les flux d'informations à mettre en œuvre dans les services. La SLMToolBox permet de créer le flux de travail et d'informations et d'y associer les acteurs. Il peut ainsi clairement afficher le tracé de l'itinéraire du flux entre les couloirs à l'intérieur de bassins au niveau BPMN. Dans MSEE, les services sont alors capturés principalement entre les voies pour mettre œuvre un service électronique. Il permet également d'identifier précisément les données (et leur structure) qui circulent dans le service.

L'outil prépare donc les actions informatiques à développer dans la plateforme de services et d'échanges. Cependant la validation dynamique du modèle n'est pas possible à ce stade ; le temps et la synchronisation pourraient permettre d'animer dans le temps un scénario et vérifier ainsi le comportement. Ceci est l'objectif du point suivant qui consiste à proposer un modèle de simulation pour étudier la dynamique du système.

4.6.7 Transformation de BPMN vers DEVS

4.6.7.1 Introduction

Dans le cadre de MDSEA (présenté en section 4.6.3), une distinction a été faite entre la modélisation statique et dynamique de système de services (Cardoso, et al., 2012). Dans la section précédente, le processus métier a été représenté en EA*, puis BPMN pour décrire une vue plus détaillée (Weske, 2007). Ces modèles de processus d'affaires fournissent une vue statique appropriée, cependant il manque une dimension temporelle pour exprimer la dynamique : un coût final, une durée, une qualité combinée des deux premiers indicateurs ou encore un test du cheminement du produit. Ce problème pourrait être surmonté en exécutant une simulation de ces processus, dont le but serait d'aider l'analyse et la compréhension du modèle de processus en fonction de sa dynamique.

Cette deuxième étape de transformation définit, dans cette section, le passage de modèles BPMN en modèles de simulation, elle est basée sur leurs métamodèles correspondants. Le formalisme DEVS permet de représenter les états du système et le temps associé au comportement du système modélisé, il paraît donc adapter au besoin. Les premiers travaux de positionnement ont été proposés en 2012 dans le stage de Master de Rabih Kazma [M2] puis ils ont été repris en 2013 par Youssef Bouanan [M4]. Ils ont été complètement formalisés et implémentés par la thèse d'Hassan Bazoun [T3]. Pour cela, un bref aperçu de la littérature existante sur la transformation BPMN vers DEVS est fourni. Les métamodèles pour BPMN et DEVS sont présentés. Après cela, la transformation de modèles de BPMN à DEVS est détaillée. Enfin, les perspectives de ce travail seront proposées à la fin de cette section.

4.6.7.2 Etat de l'art

Quelques travaux préfigurent un cadre de transformations BPMN pour DEVS. En particulier, les auteurs de (Çetinkaya, et al., 2012) et (Mittal, 2013) ont présenté un cadre de développement dirigé par les modèles (MDD) pour la modélisation et la simulation (MDD4MS). Dans cette étude, ils ont défini le besoin de transformation de BPMN comme un

langage de modélisation conceptuelle vers DEVS pour une spécification formelle du modèle de simulation. Des métamodèles BPMN et DEVS ont été présentés. En outre, un ensemble de règles de transformation ont été définies afin de transformer les modèles BPMN en modèles DEVS. Selon ces règles, certains concepts BPMN (Pool, Lane, Sous-Processus) ont été mappés en composants DEVS couplés, tandis que les tâches, les événements (Start, End et intermédiaire), et la passerelle ont été mappés en composants DEVS atomique.

En comparant le métamodèle BPMN défini dans les travaux existants avec la dernière version de BPMN 2.0 (OMG, 2011), nous pouvons conclure que plusieurs concepts sont absents et n'ont donc pas été transformés en concepts DEVS correspondants. Notamment, les auteurs n'ont pas particularisé les différents types de tâches BPMN (*UserTask*, *ManualTask*, *ServiceTask* ...) et les événements BPMN intermédiaires (messages, signaux ...) qui peuvent être interprétés différemment lorsqu'ils sont transformés en DEVS. La différence pourrait se fonder sur la configuration des états formant un modèle atomique DEVS. Sur la base de ces remarques, le travail présenté dans cette section a pris en considération ces points en bénéficiant des travaux précédents et en proposant un nouveau mappage et de nouvelles règles de transformation.

4.6.7.2.1 *Rappels du Formalisme DEVS*

Le formalisme *Discrete Event Specification* (DEVS) a été proposé par B.P. Zeigler à partir de 73 (Zeigler, 1976). Il est basé sur une représentation à états, temps et événements discrets pour la modélisation et la simulation. C'est un modèle à retard pur de Moore. Il fournit un cadre avec des concepts mathématiques basés sur les concepts de la théorie des ensembles et des systèmes pour décrire la structure et le comportement d'un système. Une des particularités de DEVS est de prévoir une durée de vie aux états. DEVS prévoit également une séparation explicite entre un modèle et son simulateur. Une fois un modèle défini, il peut être utilisé dans un simulateur (un dispositif capable d'exécuter les instructions du modèle) pour observer la dynamique du modèle. DEVS connaît deux types de modèles: les modèles atomiques, qui décrivent les comportements et les modèles couplés qui décrivent une hiérarchie.

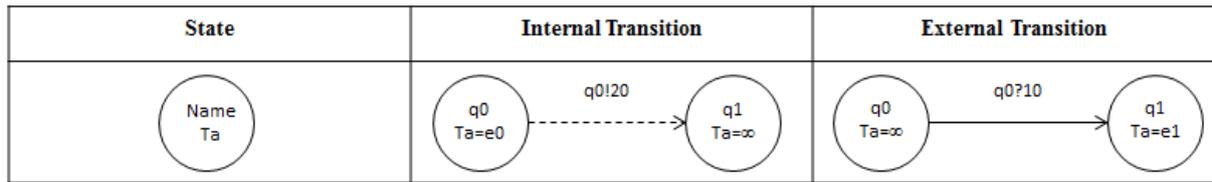
L'élément basique dans le DEVS formalisme est le modèle atomique. Il est composé de:

$$AM = \langle X, Y, S, ta, \delta_{int}, \delta_{ext}, \lambda \rangle$$

La sémantique de cette définition est donnée comme suit. A tout moment, un modèle atomique DEVS est dans un état de $s \in S$. En l'absence d'événements extérieurs, le modèle restera dans cet état pendant la durée indiquée par $ta(s)$ (fonction de durée de vie de l'état « *Time Advance* »). Lorsque le temps est écoulé « *elapsed* » $e = ta(s)$, la durée de vie de l'état est expirée et le modèle atomique peut envoyer une fonction de sortie $\lambda(s)$. Il effectue également à l'expiration de $ta(s)$ une transition interne $\delta_{int}(s)$ vers un nouvel état spécifié.

Cependant, la transition d'état peut également se produire en raison de l'arrivée d'un événement extérieur qui amènera le modèle dans un nouvel état spécifié par $\delta_{ext}(s, e, x)$; où s est l'état actuel, e est le temps écoulé, et X est la valeur d'entrée. La fonction de l'avance de temps $ta(s)$ peut prendre n'importe quelle valeur réelle de 0 à ∞ . Notons d'une part, qu'un état avec $ta(s)=0$ est appelé état transitoire, et d'autre part, si $ta(s)=\infty$, l'état est dit passif, le système restera dans cet état jusqu'à la réception d'un événement externe.

Le Tableau 8 présente la notation graphique (Song & Kim, 1994) du modèle atomique DEVS.

Tableau 8. *Notation Graphique DEVS*

4.6.7.2.2 Outils DEVS

Suite au choix du formalisme, le choix d'un outil supportant la modélisation DEVS en cible de la transformation du modèle BPMN a nécessité la réalisation d'une revue de la littérature d'outils de simulation DEVS actuels. La littérature rapporte un nombre important d'outils éditeurs DEVS utilisés à la fois pour la modélisation et l'exécution à haute performance. Pour résumer, le groupe de normalisation DEVS maintient sur son site Internet la liste à jour des outils DEVS les plus utilisés connus par la communauté DEVS (Wainer, 2013). Dans [C18], nous avons décrit et comparé les outils les plus usités.

ADEVES a été le premier outil de DEVS développé en C++ par l'Université de l'Arizona. Il consiste en un simulateur ad hoc. Des classes abstraites DEVS doivent être étendues par les utilisateurs pour définir des modèles atomiques et couplés. La simulation peut être ensuite lancée. L'inconvénient réside dans le fait que l'utilisateur a besoin de qualification en programmation pour coder les modèles.

DEVJAVA est un framework Java dans lequel le noyau simulateur est ADEVES. Il prend également en charge la modélisation et la simulation de DEVS avec des structures variables. Cependant, au niveau atomique, l'utilisateur doit mettre en œuvre le comportement DEVS correspondant en Java (à notre avis l'utilisateur n'a pas suffisamment de compétences pour programmer ses modèles atomiques).

CD++ Builder est un environnement de modélisation et de simulation DEVS qui intègre des caractéristiques et installations intéressantes pour l'utilisateur. Il permet la modélisation et la simulation d'autres formalismes DEVS (cell-DEVS, quantified-DEVS, etc.). Il fournit un éditeur graphique DEVS pour modéliser les modèles couplés et atomiques, et les encapsuler grâce à des composants pour une réutilisation ultérieure.

D'autres outils DEVS sont dédiés à des domaines spécifiques. VLE propose un cadre de M&S C++ qui intègre des modèles hétérogènes de différents domaines scientifiques. Cette intégration est basée sur le paradigme agents. En outre, JDEVES est une implémentation Java d'un cadre formel DEVS. Il prend en charge la modélisation multi-paradigmes basée sur DEVS. Il assure l'interopérabilité entre les composants réutilisés. SIMSTUDIO peut être aussi considéré. Il est axé sur un éditeur DEVS simplifié pour non experts DEVS. LISIS_DME pour sa part se concentre sur une interface et une source graphique de génération de code, le modèle peut être complété par la construction et l'appel de fonctions Java complexes.

En conclusion, chaque outil DEVS prend en charge des aspects intéressants tels que la couverture complète des DEVS basiques et proposent différentes vues de modélisation. Néanmoins nous avons été confrontés à la difficulté d'importer des modèles DEVS codés par un autre outil ou plus compliqué encore des modèles Non-DEVS, à savoir l'interopérabilité reste limitée. Nous suggérons que l'alimentation des outils par d'autres modèles puisse être facilitée en suivant une approche Model Driven, par exemple, MDA. Un concept de base de MDA est la notion de métamodèle nécessaire pour chaque modèle, mais qui ne fait pas aujourd'hui consensus pour DEVS. Même si l'article (Garredu, et al., 2012) fait un état de l'existant et essaye de proposer un premier métamodèle.

4.6.7.3 Concepts de Transformation de Modèles de BPMN 2.0 vers DEVS

Cette section présente les grands principes de transformation du modèle BPMN vers un modèle DEVS, y compris l'architecture de transformation, le métamodèle DEVS, le mappage des concepts BPMN vers les concepts DEVS, et leurs mises en œuvre en utilisant un langage de transformation.

4.6.7.3.1 Architecture de Transformation

L'approche par métamodèle (OMG, 2003) est l'une des techniques de transformation les plus utilisées. La Figure 43 présente l'approche par métamodèle adaptée au contexte de la transformation du modèle de modèle BPMN 2.0 vers un modèle DEVS. Cette étape reprend les principes de transformation présentés précédemment entre EA* et BPMN.

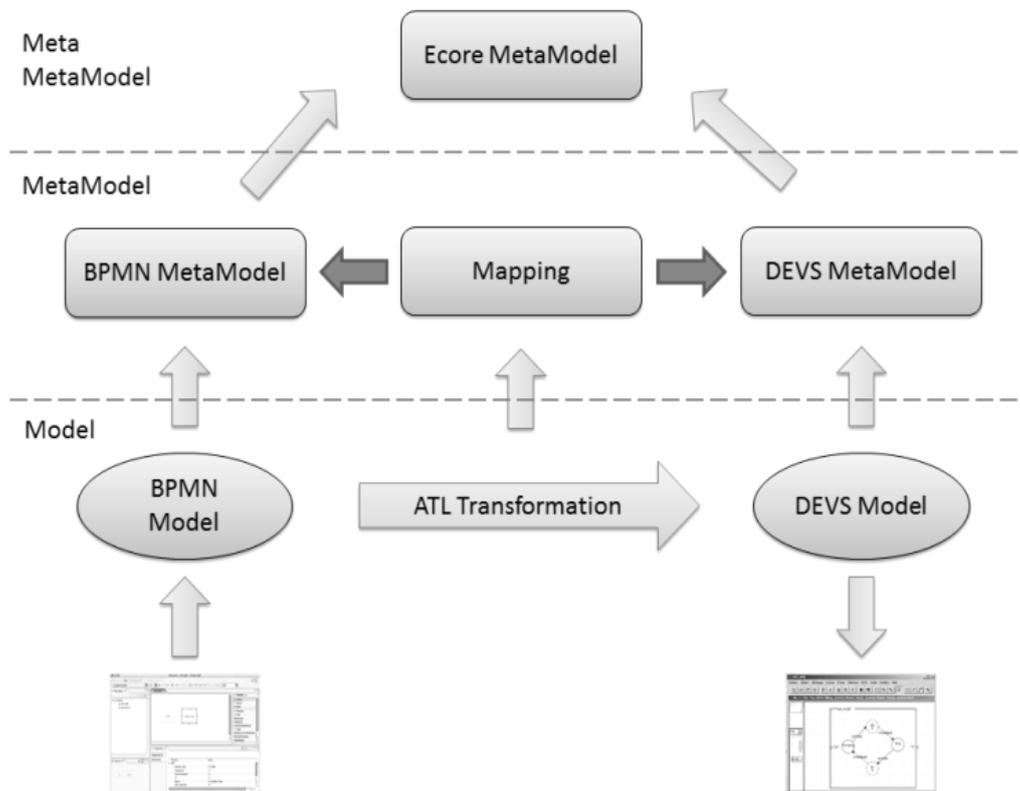


Figure 43. Architecture de Transformation BPMN vers DEVS

Trois différents niveaux sont identifiés : modèle, métamodèle et méta-métamodèle. Le modèle BPMN est le modèle source à transformer, tandis que le modèle DEVS est le modèle cible résultant de la transformation ATL. Les modèles BPMN et DEVS sont respectivement conformes à BPMN 2.0 et au métamodèle DEVS. En outre, les deux métamodèles conformes à un méta-métamodèle Ecore nommé (McNeill, 2012) métamodèle. Une correspondance est définie entre les concepts de BPMN 2.0 et de DEVS. Ce mappage est réalisé par ATL (*Atlas Transformation Language*) proposé par l'équipe de J. Bezivin (Jouault, et al., 2014).

4.6.7.3.2 Métamodèles BPMN et DEVS

Les métamodèles source et cible doivent être bien identifiés afin de procéder à la transformation selon la Figure 43. Le métamodèle BPMN 2.0 spécifié dans [OMG 2011] est

le métamodèle source. Il n’y a pas métamodèle approuvé pour le métamodèle cible DEVS, mais plusieurs recherches ont eu lieu dans le but de construire un métamodèle DEVS. Un travail de synthèse est proposé dans (Garredu, et al., 2012). La transformation de BPMN à DEVS a donc requis de réunir les travaux antérieurs pour établir un métamodèle DEVS de consensus. Nous avons proposé un métamodèle DEVS simplifié. Il est utilisé dans nos travaux comme un métamodèle cible conforme à la spécification DEVS (Zeigler, et al., 2000). La Figure 44 présente le métamodèle DEVS défini au format Eclipse Ecore.

La spécification DEVS décrit deux types de modèles : les modèles atomiques et couplés. Chaque modèle dispose d’une liste de « *InputPorts* » et « *OutputPorts* ». Un modèle atomique a quatre fonctions principales : transition interne, transition externe, sortie et fonction d’avancement du temps. Un modèle couplé est une décomposition hiérarchique de modèles DEVS atomiques ou couplés. Il existe trois types de couplage entre les ports : le couplage d’entrée externe (connexions entre les *InputPorts* du modèle couplé et ses composants internes), le couplage de sortie externe (liens entre les composants internes et les *OutputPorts* du modèle couplé) et le couplage interne (connexions entre les composants internes).

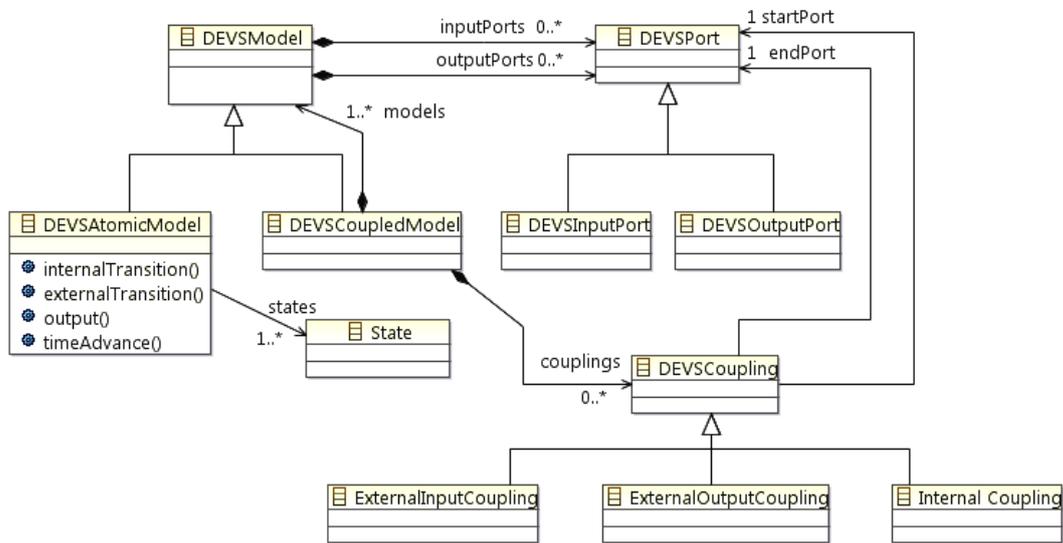


Figure 44. Métamodèle Simplifié DEVS

4.6.7.3 Mappage de Concepts

Le rôle du mappage dans la transformation du modèle consiste à définir les liens entre les concepts et les relations des deux métamodèles (BPMN et DEVS). Dans (Mittal, 2013), une première cartographie de mappage a été proposée par les auteurs. Néanmoins, cette cartographie ne distingue pas les différents types de tâches et événements de BPMN 2.0 qui distinguent notamment les situations potentielles qu’une tâche peut traiter.

Pour compléter cette approche, différents types de tâches sont détaillées (tâche de réception, tâche d’envoi, tâche utilisateur, groupe de services, et tâche manuelle). Toutes ces tâches sont mappées en concept de modèle DEVS atomique mais avec un comportement local différent. Ceci est également appliqué aux événements intermédiaires (réception et envoi de messages). Aussi, nous distinguons clairement les jetons et les messages. La structure de jetons et des messages est un événement multi-valeur comme il est possible de définir en G-DEVS [R12]. Cela est mis en œuvre par un objet avec plusieurs variables. Chaque variable représente une donnée. Certaines informations du jeton seront mises à jour par le flux de travail en fonction des actions définies dans la tâche, les valeurs actuelles du jeton, et le

message reçu. A la fin, le jeton reflète le chemin parcouru, la durée, etc. Toutes les données sont suivies afin de calculer des indicateurs de performance. Ce document ne détaille pas chaque concept, seuls les plus pertinents seront élaborés par la suite.

4.6.7.3.1 Tâche (Tasks)

Modèle de tâche de base : une tâche est une activité dans laquelle un travail est effectué par une ressource. Il consomme une certaine quantité de temps. Un jeton « Token » représente l'élément de travail avec son statut d'arrivée. Cet état évolue lors de la simulation. A la fin de la simulation, des données symboliques sont utilisées pour analyser les indicateurs de performance en ce qui concerne l'achèvement des processus de service.

Une tâche est spécifiée par les paramètres suivants :

- Le temps de travail nécessaire pour compléter la tâche par une ressource sur un jeton.
- Une fois qu'une tâche est exécutée la valeur d'un jeton change, le jeton est décrit par des variables qui sont affectées par le processus.

Pour représenter le comportement d'une entreprise avec une certaine durée, la composante de simulation de la tâche va retarder un jeton arrivant au port d'entrée pour une période de temps spécifiée avant de l'envoyer vers le port de sortie. La Figure 45 décrit modèle DEVS d'une tâche BPMN de base par son équivalent DEVS selon la représentation graphique (Song & Kim, 1994).

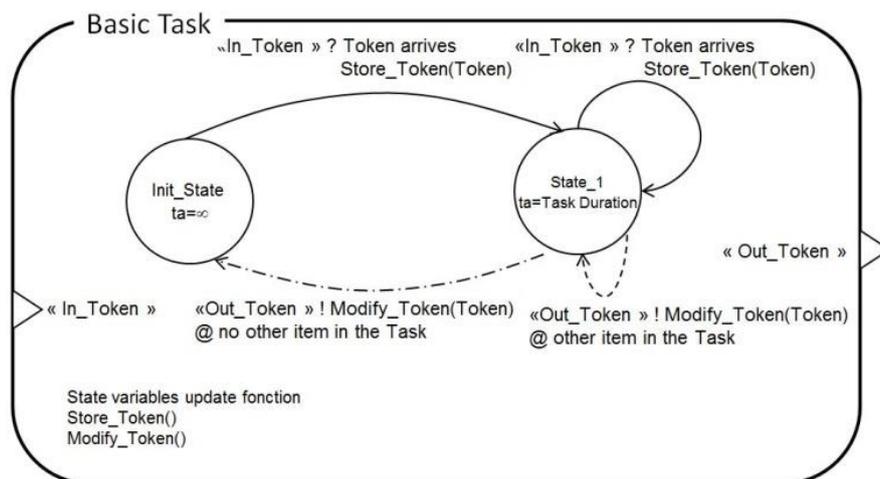


Figure 45. Diagramme d'Etats DEVS d'une Tâche Basique

Lorsqu'une tâche est dans l'état « Init », cela signifie qu'aucune ressource n'effectue actuellement cette tâche. L'arrivée d'un événement extérieur, produit un changement d'état vers « State_X » avec $\{X \in [1 \dots *]\}$. La tâche est déclenchée par le jeton seulement. Ensuite, l'activité nécessite une certaine durée, suite à cela le jeton est libéré avec un retard et des modifications sont apportées sur ses attributs de variables.

Modèle de Tâche Réception (Reception Task) : Pour une correspondance plus précise entre le modèle BPMN et le modèle DEVS il a été choisi de distinguer le « Groupe de Réception » de la « Tâche de Base » (Figure 46). La raison est basée sur la synchronisation entre la tâche considérée et un message de déclenchement qui peuvent provenir d'une autre

voie ou bassin (Pool) ressources. Dans ce cas, la réception du jeton n'est pas suffisante pour lancer la tâche; la tâche est soumise à un message de déclenchement.

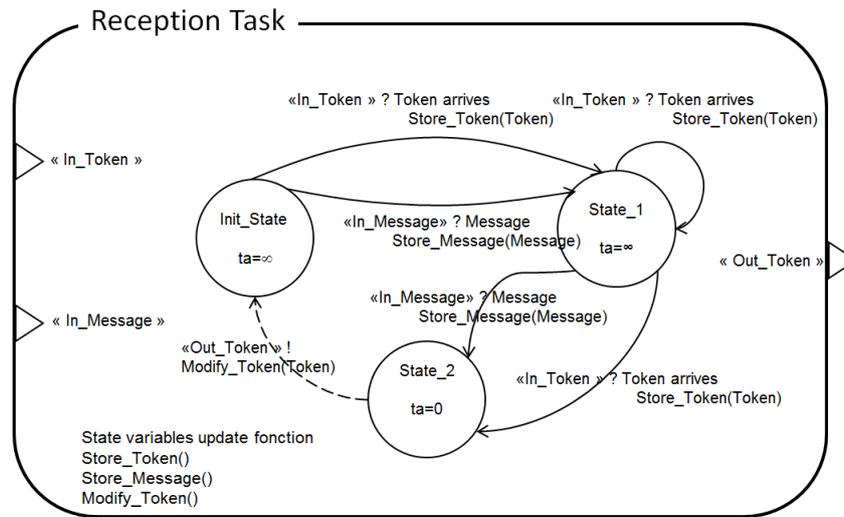


Figure 46. Diagramme d'Etats DEVS d'une Tâche Réception

Nous distinguons deux types de « InputPort » : pour la réception d'un objet message ou d'un objet jeton « Token ». Le type de « OutputPort » est uniquement un objet Token. L'action de cette tâche consiste à traiter le message d'entrée reçu qui contient des informations qui seront utilisées pour modifier le jeton, comprendre le type du jeton ou tout simplement pour modifier des valeurs d'attributs.

4.6.7.3.2 Evénements

La notion d'événement est utilisée pour représenter une étape de contrôle dans le processus, son sens diffère des événements DEVS. Ces événements intègrent le flux du processus par trois types d'événements. Selon leurs positions dans le flux ils sont : Événement de Démarrage, Événement intermédiaire ou Événement Final. Nous avons choisi de présenter le modèle DEVS d'Événement de réception intermédiaire (Figure 47).

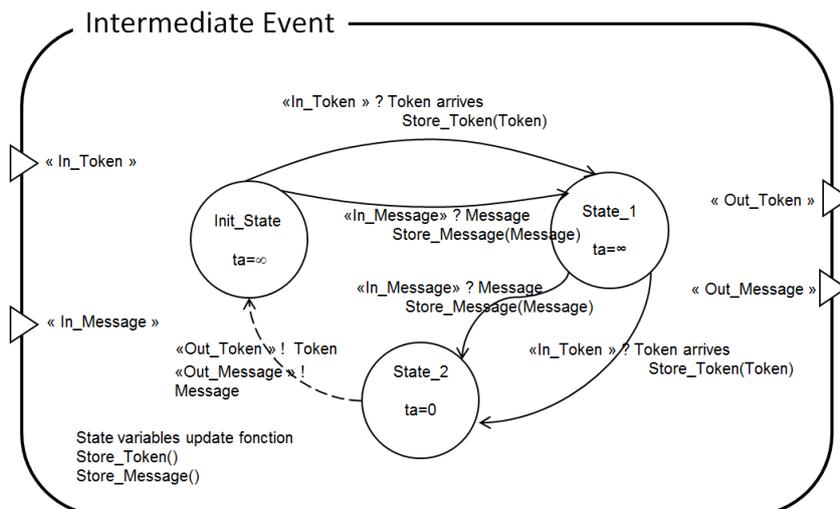


Figure 47. Diagramme d'Etats DEVS d'un Événement Intermédiaire

Un événement intermédiaire peut se produire dans le flux de processus. Cela signifie qu'un événement de déclenchement est nécessaire pour continuer le processus. Un « IntermediateEvent » peut se produire en sortie d'une « Tâche » ou d'un « Sous Processus ».

Dans ce cas, il s'agit d'un événement déclenché au cours de l'activité. Il indique que quelque chose peut arriver et/ou interrompre le cours de l'action, en provenance d'une autre ligne, ou d'un autre bassin, entre le début et la fin d'un processus.

Le Tableau 9 présente la synthèse de la correspondance entre BPMN et DEVS. Il détaille avec un astérisque (*) les nouveaux concepts ajoutés au regard des approches précédentes de la littérature, rappelées dans la section précédente.

En particulier, les concepts : activité (*Task*) et flux (*Sequence and Message Flow*) ont été transformés en modèles atomiques spécifiques capables de transformer l'information et de la relayer. Les concepts d'évènements et d'états de DEVS ont permis de facilement assurer ce *mappage*. La modularité et l'approche hiérarchique de DEVS est un atout pour aborder la définition des modèles BPMN complexes en proposant de définir des bibliothèques de modèles réutilisables. La prochaine sous-section détaille la mise en œuvre de ces concepts.

Tableau 9. *Mappage des Eléments BPMN vers les Composants DEVS*

| BPMN | | DEVS |
|--|--|--------------------|
| Pool | | DEVS Coupled Model |
| Lane | | DEVS Coupled Model |
| Sub process | | DEVS Coupled Model |
| Flow | | |
| Message Flow* | | DEVS Atomic Model |
| Sequence Flow* | | |
| Task | | |
| Basic Task | | DEVS Atomic Model |
| Send Task* | | |
| Receive Task* | | |
| Event | | |
| Start* { Message, Timer, Conditional } | | DEVS Atomic Model |
| Intermediate* { Message, Signal, Conditional } | | |
| End* { Message, Timer, Conditional } | | |
| Gateway | | |
| Exclusive Gateway | | DEVS Atomic Model |
| Inclusive Gateway* | | |
| Parallel Gateway | | |

4.6.7.4 Implémentation

4.6.7.4.1 Langage de Transformation

ATL est un langage de transformation de modèles spécifiant à la fois un métamodèle et une syntaxe concrète textuelle. Dans le domaine de l'ingénierie dirigée par les modèles (MDE), ATL fournit aux développeurs un moyen de spécifier la façon de produire un certain nombre de modèles cibles à partir d'un ensemble de modèles sources.

ATL est caractérisé par son approche hybride pour modéliser la transformation. La plupart des étapes d'une transformation à mettre en œuvre peuvent être spécifiées dans le style déclaratif d'ATL. Parce que le code de style déclaratif n'est pas aussi expressif que du code impératif, certains problèmes de transformation de modèles sont difficiles à mettre en œuvre en utilisant une approche uniquement déclarative. Par conséquent ATL propose également un support pour code impératif. Le code impératif peut être utilisé pour faire des blocs de règles de transformation, ou complètement séparé des règles d'assistance.

Le code ATL est compilé et exécuté par le moteur de transformation ATL. ATL ne prend en charge que les transformations unidirectionnelles et offre un support dédié pour le traçage. L'ordre d'exécution des règles est déterminé automatiquement, à l'exception des règles

souples « *lazy* » qui ont besoin d'être appelées explicitement. Des fonctions d'assistance aident les constructions impératives. ATL ne supporte pas la transformation incrémentale du modèle, donc un modèle source complet est lu et le modèle cible complet est créé.

Un composant M2M ATL (éclipse) est développé dans le projet Eclipse Modeling (EMP). L'environnement ATL intégré (IDE) fournit des outils de développement standard (coloration syntaxique, débogueur, etc.) qui visent à faciliter le développement de transformations ATL. Le projet ATL comprend également une bibliothèque de transformations ATL. Le projet utilise ATL M2M pour des raisons de conformité avec la SLMToolBox également développé sous Eclipse et présenté dans la section suivante.

4.6.7.5 SLMToolBox

La SLMToolBox (Boyé, et al., 2014) est un outil logiciel développé par (Hardis, 2012) dans le cadre du projet MSEE. La SLMToolBox sera utilisé par les entreprises qui souhaitent développer un nouveau service ou améliorer un service existant, au sein d'une seule entreprise ou d'une entreprise de fabrication virtuelle (FUTURPROD, 2013). L'outil sera utilisé au stade de la « prescription » et du « design » du processus de l'ingénierie des services. La SLMToolBox est considérée comme une intégration de plusieurs concepts scientifiques liés aux services en un seul outil. Ces concepts peuvent être résumés dans la méthodologie MDSEA, par la modélisation, l'ingénierie, la simulation, la surveillance et le contrôle de services.

La fonction de simulation est basée sur les modèles BPMN transformés en modèles DEVS. Le modèle source BPMN est extrait de l'éditeur BPMN (de la SLMToolBox) par un moteur de transformation, mis en œuvre avec ATL, et génère en sortie un modèle DEVS. L'outil de visualisation graphique et de simulation de modèles DEVS est basé sur [R12], [R13] et (Touraille, et al., 2011). Ces composants sont en cours d'intégration dans la SLMToolBox au moment où ce document est réalisé.

4.6.7.6 Etude de Cas

Un modèle issu de MSEE a été réutilisé pour servir d'étude de cas. Ce processus de l'industrie textile consiste à créer un modèle (patron) de tissu personnalisé pour chaque client en s'adaptant aux données fournies par les clients.

Dans le projet, la modélisation démarre au niveau BSM avec la création d'un modèle EA*. L'étape suivante transforme le modèle vers BPMN au niveau TIM. A ce niveau, en cours de spécification, et avant la création du service technologique, il peut être utile de simuler le comportement du service afin de corriger les erreurs de conception d'un modèle statique qui restent invisibles à la lecture (ou par validation syntaxique) et ne peuvent être détectées qu'en dynamique. Un extrait du modèle BPMN est détaillé sur la Figure 48. Deux bassins, client et fabricant, sont décrits dans ce cas d'utilisation. La séquence et les messages échangés avec le client sont particulièrement considérés. La contribution spécifique de ce travail de recherche permet tout d'abord de différencier le type d'événement au niveau BPMN depuis l'EA*. Le modèle décrit, par exemple, un flux informationnel provenant d'un événement intermédiaire. En outre, l'événement intermédiaire émet un message vers un pool aveugle (avec réception et déclenchement d'action basiques). Nous considérons cet exemple comme une expression représentative des modèles de collaboration BPMN 2.0.

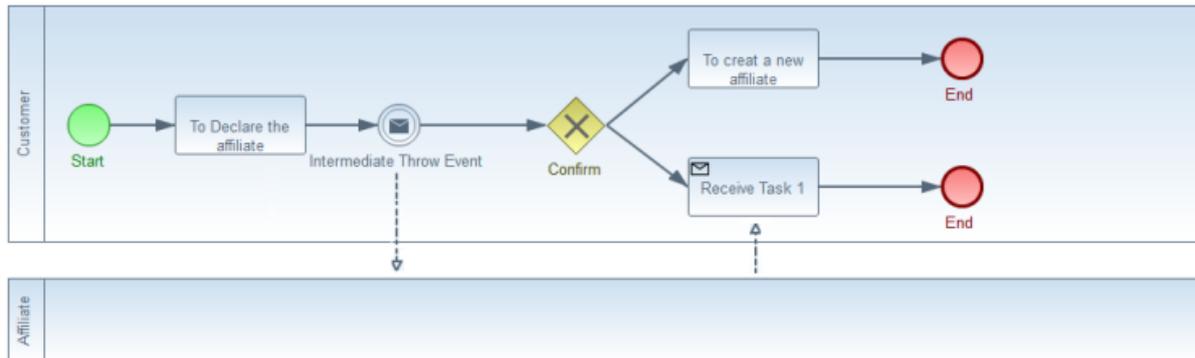


Figure 48. *Modèle Représentatif BPMN 2.0*

Au niveau DEVS, l'éditeur de LSIS_DME [R12] [C18] a été provisoirement sélectionné pour effectuer des tests sur les modèles DEVS obtenus à partir du mappage BPMN. Ceci avant le choix ou le développement du moteur de simulation final DEVS pour la SLMToolBox. L'intérêt pour cet outil vient du fait qu'il permet la création, le stockage en bibliothèque, la modification et la composition de modèles basés Java et XML [C10]. Il peut donc être alimenté dans notre cas par la transformation ATL de modèles BPMN. En outre, l'éditeur permet de modifier visuellement un modèle avec des items graphiques représentant les différents éléments d'un modèle atomique ou couplé DEVS.

Le mappage a permis de réaliser une librairie de modèles DEVS couplés à partir des composants BPMN (Figure 49). Elle a été intégrée dans une bibliothèque DEVS_BPMN de LSIS_DME. Le modèle couplé DEVS présenté dans la Figure 49 représente le résultat de la transformation de l'extrait choisi dans le modèle BPMN de la Figure 48.

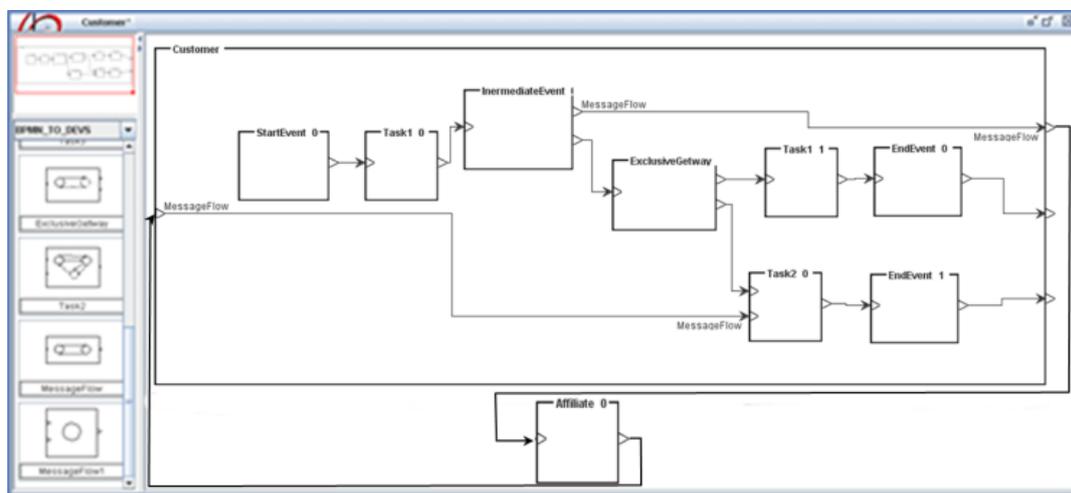


Figure 49. *Modèle Représentatif DEVS Equivalent Visualisé dans LSIS DME*

Le modèle décrit Figure 49 a été simulé avec LSIS_DME pour produire des résultats de simulation. Dans cette simulation, il a été confirmé que les variables symboliques : « token », déclarées à l'état initial de chaque modèle atomique : « événement déclencheur » peuvent être suivies. L'évolution de la valeur de leurs attributs résulte des activités : « actions » du processus au regard du temps. Les nouvelles valeurs dépendent des opérations, des tâches et des messages reçus. Le résultat principal émanant des premières simulations réalisées est la preuve de faisabilité en termes de définition et de suivi des indicateurs de qualité, ainsi que la capacité de mesurer l'impact des facteurs de production et des paramétrages. L'objectif est de fournir des évaluations par simulation des choix de modèles et de paramétrage pour approcher au mieux les services spécifiés et leur comportement souhaité.

Le résultat de simulation en Figure 50 présente un extrait de sortie de simulation. La simulation a été mise en place pour suivre les indicateurs de performance sur les jetons. Les jetons recueillent des informations sur la construction d'un service et sa livraison. Par exemple, le temps pour livrer un service peut être calculé au cours de la simulation. Le nombre de ressources appelées à réaliser le processus de prestation de services et le coût des ressources matérielles et humaines peuvent également être calculés en utilisant la simulation. Un autre point est l'analyse de l'échec dans la prestation d'un service. Certaines constructions de service peuvent entraîner des retards et empêcher de livrer le service à temps. Plusieurs scénarios peuvent être exécutés pour évaluer avant l'étape de mise en œuvre de l'architecture.

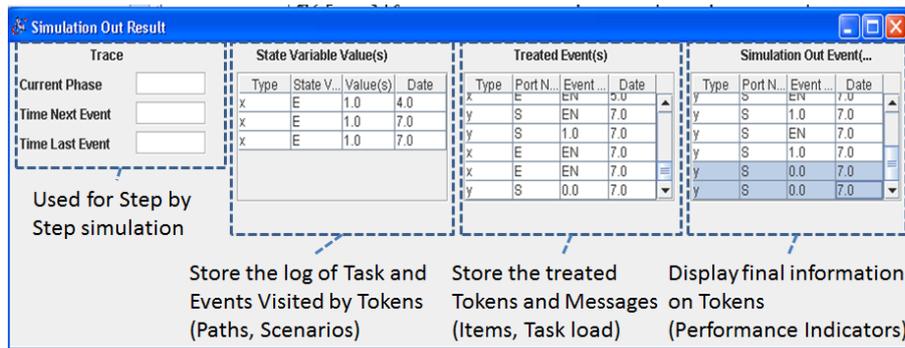


Figure 50. Exemple de Résultat de Simulation d'un Modèle DEVS de Workflow BPMN

4.6.8 Conclusion

Ce travail a été soutenu par le Projet (MSEE, 2012). Il a introduit la modélisation et la transformation des processus de biens et de service et leurs simulations dans le cadre de la méthodologie MDSEA. Ce sont intégrés dans ce travail, la thèse d'Hassan Bazoun [C4] [C5] et le travail de Master de Youssef Bouanan [C4]. Le résultat est une méthodologie de transformation des modèles EA* vers BPMN puis en modèles DEVS. Nous nous sommes basés sur l'expérience de recherches antérieures dans ce domaine. Nous avons spécifié une cartographie formelle des mappage des concepts EA*, BPMN et DEVS, l'architecture formelle de mappage et de transformation, et enfin la mise en œuvre d'un outil (SLMToolBox). Nous avons également investigué dans ce domaine un sujet d'étude de production de PSS avec Thècle Alix, dans lequel nous avons modélisé la production de services pour l'industrie du jouet qui n'est pas détaillée ici mais peut être lue à [R6] et [I3].

En outre, nous avons identifié des perspectives. Le travail en cours consiste à intégrer la version finale du moteur de simulation, la définition et l'intégration des indicateurs de performances dans la SLMToolBox. Enfin la dernière perspective proposera l'animation du modèle BPMN sur la base des résultats de simulation dans un objectif pédagogique.

4.6.9 Résultats

Ces travaux ont permis le co-encadrement à 50% avec Yves Ducq de Hassan Bazoun (Mars 2012) « Methodology of Model Transformation Using MDA/MDI », nous avons soumis un article de journal et 4 papiers de conférence ont été présentés. Nous avons publié 2 articles en revue [R6] [R7] avec IF, un papier invité [I3] et 3 conférences sur les PSS.

Ces travaux ont également été réalisés par :

- Encadrement 100% Rabih Kazma (Fev-Jul 2012) « BPMN Transformation to M&S »
- Encadrement 100% Youssef Bouanan (Mars-Jul 2013) « BPMN to DEVS Model Transformation for Simulation », 1 papier de conférence a été présenté

4.7 Conclusion des Travaux Réalisés

L'ensemble des travaux effectués s'intègrent dans ce tronc commun qui consiste à supporter la transformation des modèles depuis les concepts vers l'implémentation d'une solution pour l'EI fédérée. La transformation intègre le passage par une étape intermédiaire pour valider des scénarios d'utilisation par simulation numérique tel que préconisé dans le rapport (FUTURPROD, 2013). Puis, la transformation génère des modèles vers le système définitif qui peut être une architecture orientée service tel que préconisé par le rapport Européen (FINES, 2012). Nous entendons « service » fourni à l'utilisateur mais également au sens service web de la plateforme logicielle et matérielle qui viendra supporter la prestation du service. Toutes ces briques ont aussi contribué à la plateforme décrite au 4.2.4.

Nous avons proposé une méthodologie d'accompagnement du cycle de développement du SI. Ces travaux ont été documentés et intègrent la découverte de modèles depuis les systèmes existants, soit obsolètes, soit intégrés par une approche SoS au nouveau système. Notre approche a permis de faire la synthèse entre les approches dirigées par les modèles « classique » type MDA / MDI, les approches dédiées simulation FEDEP et les approches orientées développement de systèmes de services qui apparaissent actuellement.

Les travaux de Zhiying Tu [T1] ont tout d'abord permis de conforter cette méthodologie de transformation depuis la découverte de modèles d'un système existant avec les méthodes Modisco jusqu'à l'implémentation d'un nouveau système reposant sur le standard HLA et les services web. Ce système repose sur la rapidité de mise en œuvre et l'interopérabilité ouverte sur le web avec les services du même nom et vers la simulation distribuée par HLA (ce qui permet également d'avoir recours à un moteur d'orchestration et de synchronisation des composants). Nous nous sommes cependant heurtés à la difficulté de découverte des modèles de comportement. Il reste à approfondir cette partie de découverte de modèles.

Dans le cadre de la thèse de Fuqi Song [T2], les travaux se sont focalisés sur l'apport des ontologies pour permettre de faciliter l'appariement des visions par le multi matching de concepts. Ces travaux, validés par des tests de performance, permettent de mapper des groupes de concepts a priori non liés et faciliter l'interopérabilité sémantique. Cette approche est prometteuse particulièrement pour le passage aux modèles de simulation, pour extraire un maximum de concepts et faciliter la transformation des modèles d'entreprise en modèles de simulation.

Hassan Bazoun [T3] propose dans sa thèse une méthodologie formalisée pour le passage des modèles conceptuels vers un modèle de simulation. Il a développé un outil open source associé : SLMToolBox. Cet outil accompagne les modélisateurs depuis un environnement graphique permettant de représenter les modèles conceptuels et leur mappage syntaxique jusqu'à la simulation basée DEVS. Il reste à valoriser et mieux exploiter les résultats de simulation par des rendus visuels et faciliter l'ajout d'indicateurs de performance dans l'outil.

Enfin Judicaël Ribault [P1] a proposé une approche pour connecter les modèles de simulation et l'appel de service. Il a développé une connectique entre les modèles et les services web d'un serveur réel. Il a dû gérer les problèmes d'émulation d'entité dans un environnement géographique et connecter des composants simulés avec des composants web en connexion avec un environnement réel. Il a validé cette approche sur un cas réel industriel. Il reste à connecter ces fonctionnalités avec la SLMToolBox pour terminer le cycle MDSEA.

L'ensemble des travaux appellent des perspectives et des travaux futurs, dont certains sont déjà initiés dans le cadre de travaux démarrants, ceci dans l'objectif d'approfondir les thèmes déjà présentés. Nous décrivons dans le chapitre suivant ces perspectives en les plaçant dans des horizons de portée à court, moyen ou plus long terme.

5 *Travaux en Cours, Initiés et Perspectives*

5.1 *Introduction*

Ce chapitre présente nos perspectives futures en continuité avec les travaux effectués et exposés au chapitre 4. Les travaux présentés ici correspondent à des recherches de positionnement effectuées en liens avec les thèmes prospectifs pour les entreprises du futur présentés dans les rapports du groupe GDR MACS STP (Grabot & Collectif, 2012), les résultats de (FUTURPROD, 2013) et la Roadmap du projet européen (FINES, 2012). Ces travaux sont situés dans des horizons temporels de maturités différentes. Ils s'inscrivent dans des scénarios prospectifs issus des éléments manquants de la plateforme 4.2.4 et des besoins de l'EI fédérée. Ils définissent ainsi mes priorités de recherche pour les années à venir.

L'« Espace socio-économique » représente, au sens de la roadmap FINES, le contexte le plus large dans lequel évoluent les entreprises. Nous ne prétendons pas traiter les problèmes du point de vue productique à ce niveau. Nous nous situons au sous niveau de l'« Espace Entreprise » où nous abordons les principales caractéristiques des futures entreprises, qui sont dénommées « Qualités d'Etre » (en anglais QB). Les QBs impactent les modèles de processus et de production, les paradigmes de gouvernance et d'organisation, les nouvelles formes de coopération : tout est orienté vers un paradigme de l'innovation continue. Cet espace comprend l'étude de nouveaux styles de relations clients/fournisseurs (nous étudierons les réseaux sociaux sous tendant ces relations) et les nouvelles formes logiques de collaboration. Ces formes pourront contribuer également au concept de l'ontologie éphémère.

L'espace « *Systèmes d'Entreprise* » est particulièrement étudié par FINES. Il recherche des solutions TIC et des systèmes sociotechniques visant à soutenir les futures entreprises émergentes qui fonctionneront avec l'Internet du futur. Les questions définies dans cet espace répondront aux besoins identifiés pour les futures entreprises qui vont de la gestion des connaissances sémantiques (nous proposons l'étude de liens sémantiques et l'utilisation du mappage ontologique) à la coopération en ligne (nous proposons de réutiliser au maximum l'existant des systèmes). Ces trois espaces FINES sont complétés par un dernier nommé « Activation de la technologie ». Cet espace de connaissances considère les futures solutions des Technologies de l'Information et Communication (TIC), en particulier l'Internet, la coopération, l'interopérabilité, la sécurité et les services autonomes et proactifs. Nous nous inscrivons dans cette démarche en mettant en œuvre des solutions basées sur les services web et la norme HLA qui pourront soutenir les SI des entreprises futures décrites au 4.2.4.

Les principales QBs de l'entreprise sont déjà au cœur de mes préoccupations dans les travaux effectués et dans le droit profil de mes objectifs. Les qualités « *Humanistic* » et « *Community-oriented* » des entreprises demandent de placer l'acteur humain au centre des préoccupations, de considérer ses besoins et sa qualité de vie au sein des communautés de travailleurs, clients, mais aussi dans les réseaux sociaux et collaboratifs au sens large. Les travaux de Youssef Bouanan [T4] œuvrent clairement dans cette direction en étudiant et en comprenant mieux les acteurs et leurs réseaux. L'objectif « *Cognitive Enterprise* » demande d'acquérir, d'organiser et de redistribuer la connaissance de l'entreprise, entre les différents acteurs avec des informations valides distribuées au bon moment. Les travaux de Fuqi Song [T2] ont proposé de faciliter ces mises en place par des approches sémantiques. Joseph Rahme Youssef continuera cette démarche.

La qualité « *Liquid Enterprise* » définit une entreprise ayant des limites floues, en termes de ressources humaines, de marchés, de produits et de processus. Les stratégies et les modèles opérationnels demandent des outils de collaboration permettant d'ajuster le périmètre.

L'approche basée sur HLA et service de Zhiying Tu a apporté un élément de réponse. Wang Yan continuera cette démarche.

L'« *Agile Enterprise* » doit réagir rapidement aux défis incessants du marché (c'est aussi le cas de l'approche fédérée de l'EI) et stimuler l'amélioration continue et l'innovation requise par la concurrence mondiale. Ceci en adoptant de nouveaux modèles organisationnels et solutions technologiques. Hassan Bazoun travaille sur une méthodologie et un outil pour redéfinir et tester plus rapidement les nouveaux processus de l'entreprise.

Enfin, la qualité « *Sensing Enterprise* » émergera avec l'évolution de l'internet des objets. Ces objets, équipements et infrastructures technologiques auront des capacités de traitement des données en réseau avancées, et coopéreront activement pour former une sorte de « système nerveux » au sein de l'entreprise. Nous avons proposé avec Judicaël Ribault [P1] une connexion simulations-services qui permet de mixer les composants réels (au travers des objets) et les composants virtuels au sein d'une même simulation.

5.2 Transformation de modèles pour la simulation

5.2.1 Introduction

Les « entreprises agiles » présentées dans le rapport (FINES, 2012) se définissent comme capables d'adapter rapidement leurs processus et leur modèles organisationnels. Cette adaptation voulue rapide doit s'accompagner de validation. Cependant le temps accordé par les projets industriels ne permet pas de valider les propositions en situations réelles. La simulation peut être un mode de validation alternatif des scénarios par anticipation de situations. Nous avons, d'un côté, avec les travaux de Hassan Bazoun traité la génération de modèle de simulation DEVS et avec Judicaël Ribault [P1] la génération d'un Workflow exécutable de services. La convergence de ces deux approches est présentée ci-dessous.

5.2.2 Propositions

Dans cet objectif, nous avons ouvert une perspective en proposant de transformer les modèles BPMN obtenus précédemment en modèles de simulation. Nous envisageons l'étape de simulation comme une étape clé dans le cycle de modélisation et transformation des processus d'affaire. Dans un horizon court d'une année, nous devrions obtenir les premiers résultats de simulation consolidés résultant de la transformation qui seront visualisés dans l'outil open source : SLMToolBox. Nous avons déjà retenu le formalisme DEVS. Le métamodèle DEVS nécessaire à la transformation est en cours d'achèvement indépendamment de l'architecture de tout simulateur. Ce travail apportera de nouvelles fonctionnalités telles qu'un nouveau format d'exportation et de stockage pour l'outil. En outre, dans un horizon un peu plus éloigné, les modèles BPMN pourront être animés sur la base des résultats de simulation pour une meilleure compréhension du processus. Grâce à la visualisation des modèles, les utilisateurs, qui ne sont pas experts en simulation, comprendront plus facilement et sélectionneront plus intuitivement des indicateurs de performance (temps, coûts et autres indicateurs combinés) qu'ils pourront suivre pendant la simulation. Cette demande s'inscrit dans le scénario 2 des perspectives STP. L'horizon de cette perspective est proche.

Pour aller encore plus loin dans la validation du modèle conceptuel dans son futur environnement, nous proposons, dans un horizon de trois ans, de composer la simulation des services non-existants ou indisponibles dans l'entreprise avec la réutilisation des services d'entreprise existants. Cette approche devrait encourager l'intégration progressive de

nouveaux composants, à ajouter au système existant, en adoptant le paradigme Système de Systèmes (SoS). Le test, grâce à la simulation, confrontera les futurs composants simulés dans le futur environnement. Cette proposition doit anticiper les problèmes que l'on peut rencontrer à la mise en œuvre finale. En particulier, les relations de causalité des événements et des appels vers les services qui sont prévus pour être enchaînés sont ici testées dans les délais et conditions prescrites pour le futur système réel.

Le premier problème est la mise en correspondance entre les concepts annoncés dans les modèles de services BPMN d'entreprise et les services techniques. Ce problème pourrait être résolu en transformant les concepts BPMN en Workflow exécutable de services comme décrit dans la Figure 51 avec le lien en pointillés allant de BPMN 2.0 vers le moteur d'un Workflow orchestration. Le deuxième problème est de traiter les services non-existants ou non disponibles dans l'entreprise. Ce problème peut être résolu en utilisant des modèles DEVS pour le comportement des services de l'entreprise défini dans la section 4.4. Nous pourrions terminer avec une couche HLA pour les rendre interopérables avec d'autres composants distribués et hétérogènes. Ceci est représenté sur la Figure 51 avec lien en pointillés depuis les Modèle DEVS et le RTI avec les travaux [R1] et [R2].

Actuellement, la SLMToolBox propose exclusivement de transformer tous les composants BPMN en modèles DEVS. L'idée proposée dans cette perspective (présentée dans [C2]) est d'adapter l'outil pour de proposer aux utilisateurs de distinguer deux sous-parties du modèle. D'un côté, la partie du modèle BPMN qui sera transformée en flux de service pour appeler les services web d'entreprises existants. Pour cette partie du modèle, l'outil va préparer les appels de service par la configuration de la demande de service et la localisation du serveur à appeler (voir section 4.5). De l'autre côté, l'autre partie du modèle sera automatiquement transformée en modèles DEVS et simulera le comportement d'une partie du système, y compris le temps de réponse et la mémorisation de l'état du processus. Les travaux en section 4.6 ont déjà posé les premières bases dans ce domaine. Cette étape ira plus loin dans le cycle de vie de MDSEA en commençant à générer de véritables appels vers les services et les systèmes externes.

5.2.2.1 Depuis BPMN vers un Workflow exécutable

Le premier problème est la mise en correspondance entre les concepts annoncés dans les modèles d'entreprise de services avec les services techniques. La SLMToolBox prépare le modèle au niveau TIM, mais ce modèle n'est pas encore étendu de primitives informatiques pour se connecter aux systèmes existants et en particulier aux serveurs qui fournissent les services web. Cette étape est censée être supposé au niveau TSM. Néanmoins, il est intéressant de tester par simulation le système dans son futur environnement réel.

Cette nouvelle étape dans l'approche MDSEA commencera à partir du modèle BPMN produit par la SLMToolbox. Le modèle gagnera en interopérabilité en codant à partir des flux de communication BPMN les primitives des appels de service. Ceci sera facilité par la structure du modèle enregistré au format XML Eclipse Ecore. Un Workflow exécutable sera généré à partir d'une partie du modèle BPMN. Ce Workflow pourra être joué avec Taverna pour séquencer les appels de service et les réponses. Il facilitera l'interopérabilité avec les services existants et fermera la boucle de vérification de service et de validation.

Après l'édition du modèle BPMN, l'utilisateur pourra annoter le modèle et sélectionner la partie à transformer en modèles de simulation ou en Workflow de services. La transformation de BPMN en Workflow exécutable pourra reposer sur les métamodèles. Taverna enregistre les Workflow au format XML, nous pourrions donc transformer un message BPMN et une partie du flux de données qui lient les « *lanes* » ou « *pools* » BPMN en flux d'appels de service Taverna abstraits. L'utilisateur remplira le détail de la requête pour l'appel de service.

5.2.2.2 De BPMN vers la Simulation DEVS des Services d'Entreprises

Le deuxième problème consiste à traiter, parallèlement, le système existant et/ou obsolète ainsi que les services non-existants ou non disponibles dans l'entreprise. L'idée est de mélanger des parties simulées avec l'environnement réel de services web.

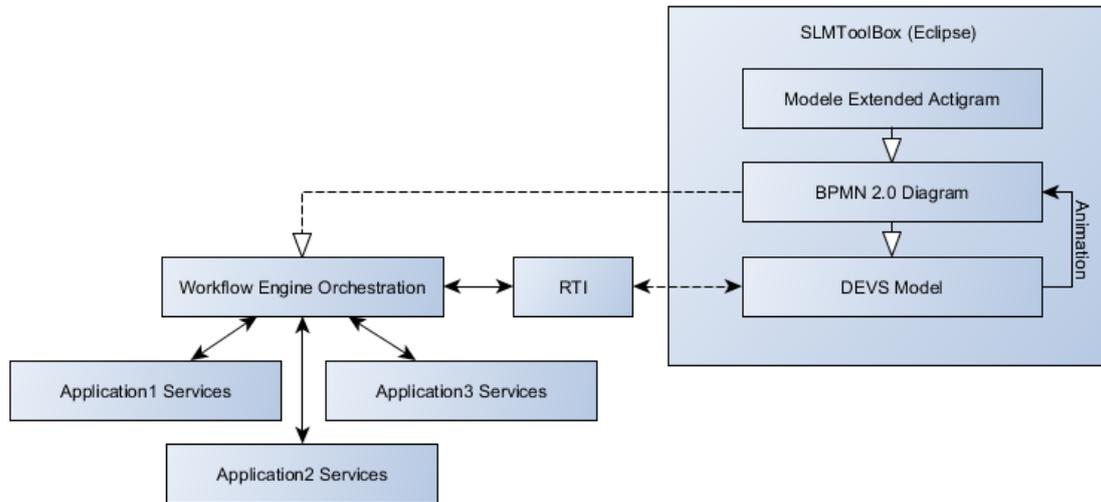


Figure 51. Framework pour les Futurs Travaux d'Extension de la SLMToolBox

Dans cet objectif, nous avons proposé dans [R1] une architecture qui compose les modèles DEVS avec les Workflows des outils de service. Le Workflow est orchestré avec un outil capable d'appeler et d'orchestrer les réponses des services web et les services qui ne sont pas déjà définis. Le système appelle un composant DEVS qui contient un comportement local lorsque le comportement d'acteurs externes est demandé. La SLMToolBox génère des modèles DEVS depuis les modèles BPMN. Après la transformation de modèles DEVS le processus peut être simulé en fonction d'objectifs de scénario. Un lien pourrait être établi pour exploiter par Taverna les résultats de simulation obtenus. Une solution permettrait de développer des services web Taverna pouvant traiter les résultats de cette simulation.

Les modèles DEVS résultant devront être étendus pour être en mesure de communiquer avec les Workflows Taverna. Dans cet objectif, les travaux proposés dans [R1] et [R8] peuvent être adaptés et réutilisés. Ils ont proposé d'intégrer des modèles DEVS en HLA « fédérés ». Ces « fédérés » gagnent les propriétés d'interopérabilité pour communiquer au sein d'une simulation distribuée, grâce à HLA. Le « fédéré » pourra publier et s'abonner à des messages dans un environnement de temps synchronisé. Néanmoins, ces modèles doivent encore être enrichis de primitives d'appel de services depuis le « monde réel », y compris la façon de former la requête et la façon d'atteindre l'URL du service.

5.2.3 Conclusion

Le rapport de simulation proposera ainsi des informations résultantes du suivi des indicateurs pour l'analyse dynamique des processus d'affaires et de leur communication avec leur environnement. Toutefois nous sommes conscients de la difficulté souvent rencontrée par le manque de données temporelles provenant des entreprises en raison de la confidentialité et/ou du manque d'expérience du domaine. Nous soulignons aussi que la réussite et la pérennité de ce travail reposera sur l'adoption de la plateforme de M&S ouverte et au développement d'une communauté d'utilisateurs et de contributeurs. Nous avons par ailleurs effectué un travail dans le cadre d'un stage de Master de Liu Zhe [M5] sur le passage de BPMN vers des Workflows du logiciel Open ERP.

5.3 Approche Sémantique pour la réconciliation des systèmes

5.3.1 Introduction

Les approches « Model-Driven », type MDA, présentées précédemment, ont été proposées pour faciliter le développement de systèmes principalement logiciels, par réutilisation de modèles. Cependant nous avons distingué dans la perspective précédente qu'il n'apparaît pas de méthode de vérification et de validation des modèles au regard de certaines exigences, par exemple une mise sous contraintes temporelles. Par ailleurs, les scénarios de prospection des projets français et européens, notamment les conclusions de l'ARP indiquent l'intérêt de « simulations anticipatrices ». Nous avons déjà considéré que la mise en dynamique pourrait aider à vérifier les modèles en exécutant ces modèles dans leur environnement pratique au niveau PIM.

Une idée intuitive projetterait de pousser plus loin cette démarche en généralisant la simulation des modèles MDA pour étudier leurs comportements. Ainsi les problèmes identifiés à un stade précoce de développement (ex : CIM) pourraient être corrigés et réduire les coûts en évitant les modifications tardives du système à l'avenir. La perspective de cette section est donc d'intégrer la simulation à chaque étape de modélisation et de transformation de MDA. Cependant, chaque modèle créé dans MDA ne peut pas facilement être systématiquement simulé. Les modèles sont principalement classés en modèles statiques (fonctionnels, structurels) ou dynamiques (comportementaux). La différence majeure provient du fait que les modèles statiques capturent les caractéristiques structurelles inchangées et indépendantes de l'exécution, alors que les modèles dynamiques décrivent une abstraction de système pendant une exécution dynamique. En général, dans MDA les modèles appartiennent à la première catégorie.

Cette perspective de recherche propose de généraliser la vérification du comportement des futurs systèmes à chaque étape MDA par anticipation ; ceci à partir de modèles dynamiques, tels que les diagrammes d'activité, et graphe d'états. Ces modèles seraient complémentaires aux modèles statiques, (diagramme de classe, diagramme objet, diagramme fonctionnel pur). Cependant le passage vers des modèles dynamiques n'est pas trivial. Une idée proposée dans le cadre de la fin des travaux de Fuqi Song [C7] est d'utiliser au mieux la connaissance du système. La représentation sémantique de cette connaissance peut utiliser des ontologies comme média facilitateur pour l'échange des informations entre les modèles MDA et la simulation. En effet, l'ontologie est une représentation formelle permettant de représenter les concepts et leurs interrelations. Les approches sémantiques font partie des scénarios futurs, en particulier, c'est une qualité de FINES « Cognitive Enterprise ». Les données des modèles MDA seront décrites par une ontologie spécifique, et l'ontologie se transformera pour aider la création de modèles de simulation. Les résultats ou objectifs attendus seront décrits dans cette ontologie pour vérifier le modèle. Une autre ontologie spécifique avec un critère de vérification des résultats permettra de générer et renvoyer aux modèles MDA des propositions d'améliorations potentielles. L'horizon des premiers résultats est attendu dans le cadre des 3 ans de la thèse de Wang Yan. Cependant l'horizon global reste sur 5 ans.

Le reste de la section est organisé comme suit. La section 6.3.2 rappelle le contexte de modélisation pour la simulation et analyse les liens existants entre MDA et la simulation. La section 6.3.3 décrit la méthode proposée pour vérifier des exigences à partir de MDA à l'aide d'ontologies et de simulations. La section 6.3.4 montre une étude de cas pour illustrer la méthode proposée. Enfin la section 6.3.5 tire des conclusions et présente les travaux futurs.

5.3.2 MDA et Simulation

5.3.2.1 Modélisation & Simulation

De façon générale, la simulation est un processus de mise en dynamique d'un modèle du monde réel afin d'observer et de vérifier un comportement selon certains points de vue. Avant de procéder à la simulation, des modèles « simulables » doivent être créés. Ainsi, il existe une étape nommée modélisation présentée dans le livre « Théorie de la modélisation et simulation » écrit par (Zeigler, et al., 2000). Une relation générique est établie entre le monde réel, la modélisation et la simulation. Dans notre situation il s'agira d'ajouter une étape de modélisation formelle de modèles conceptuels.

En se concentrant sur certains aspects de la réalité, cette dernière est abstraite puis représentée dans les modèles, à savoir, les modèles sont l'abstraction de la réalité à partir d'un point de vue spécifique. Notre point de vue devra faire apparaître les aspects dynamiques qui ne sont pas présents dans les modèles MDA. La simulation pourra être réalisée en exécutant les modèles sur des systèmes informatiques avec un langage de simulation. (Pollacia, 1989) donne un examen comparatif des langages de simulation à événements discrets. L'objectif est d'obtenir depuis le modèle MDA un modèle de simulation pour observer les comportements du système, afin de mieux comprendre et prédire certains comportements.

5.3.2.2 Liens entre MDA et les Modèles de Simulation

(Ören, 1977) et (Zeigler, 1976) ont décrit un modèle comme un consensus sur une abstraction des phénomènes du monde réel, en d'autres termes, une représentation d'un aspect du monde dans un but précis. Il est clair qu'un modèle n'a de sens que par des objectifs et une portée. En général, les modèles MDA et les modèles de simulation mettent l'accent sur différents aspects. Les modèles de MDA essaient de capturer la réalité du monde réel ou des systèmes futurs en explorant certains aspects. Par exemple, BPMN est utilisé pour analyser les processus de l'entreprise, le diagramme Entité-Relation permet de représenter la structure de données, et les diagrammes d'états étudient les séquences comportementales de changements d'états. Les modèles de simulation se concentrent davantage sur les contraintes liées à la mise en œuvre (réalisation), ces modèles doivent être exécutables. Les principaux éléments de la simulation sont les événements, le temps et les comportements. Ainsi, avec l'aide de la transformation de modèles et de l'information supplémentaire, les modèles créés dans MDA peuvent être exécutés pour la simulation.

Dans MDA, la création de modèles et la transformation sont deux activités principales, à savoir, MDA est un processus de modélisation intensive. Les modèles restent à un niveau abstrait avant le code. Un problème existant est de savoir comment vérifier si ces modèles sont « bons » au regard de la spécification du système. Une norme générale est que M est un bon modèle de S si M permet de répondre à des questions prédéfinies sur S de manière satisfaisante (Zeigler, 1976). Cette considération reste assez floue et difficile à formaliser. Mais nous pouvons constater qu'un bon modèle doit aussi respecter des faits comme atteindre des objectifs en simulation. La vérification d'exigence pourrait être un complément important à MDA. Cette perspective de recherche présente un cadre pour la simulation de MDA dans l'objectif de vérifier un modèle par respect des exigences spécifiées à un niveau élevé.

5.3.2.3 Ontologie & Simulation

L'ontologie est portée vers la simulation dans les recherches récentes (Zeigler & Hammonds, 2007), (Tolk, 2012) et (Ören, et al., 2007). Les auteurs (Turnitsa, et al., 2010) ont déclaré que les deux rôles de l'ontologie dans la simulation sont : une spécification et un

accès commun à l'information. Par ailleurs, (Tolk, 2013) y voit un moyen d'automatiser l'interopérabilité par une compréhension commune des concepts manipulés. Dans ce travail prospectif, l'ontologie pourra utiliser ces deux aspects afin de faciliter l'interopérabilité entre le modèle MDA et la simulation.

5.3.3 Adapter la Modélisation de Simulation à MDA

Dans cette section, nous décrivons comment la simulation pourra être appliquée avec MDA. Tout d'abord, une structure générale pour combiner simulation et MDA est illustrée, et ensuite une ontologie spécifique pour l'échange d'information est proposée.

5.3.3.1 Structure Générale

En suivant la structure MDA et les liens discutés dans la section précédente, une structure générale pour adapter simulation et MDA a été proposée et présentée dans [C7]. Elle est illustrée par la Figure 52. Les niveaux CIM, PIM et PSM restent au centre du processus de modélisation pour créer les différents modèles. Cependant, dans cette structure, un processus parallèle de simulation sera utilisé pour vérifier les modèles en respectant les besoins spécifiés. Un processus itératif entre la modélisation et la simulation de MDA est conçu pour impliquer la simulation à chaque étape MDA. Les informations concernant les événements et les comportements seront renvoyées depuis le tronc de spécification MDA pour effectuer le processus de simulation. Les résultats des simulations seront comparés avec les résultats attendus et généreront ainsi un rapport de vérification. Ce rapport pourra être utilisé pour améliorer le processus de modélisation MDA. Si nécessaire, plusieurs itérations d'une étape du processus pourront être effectuées.

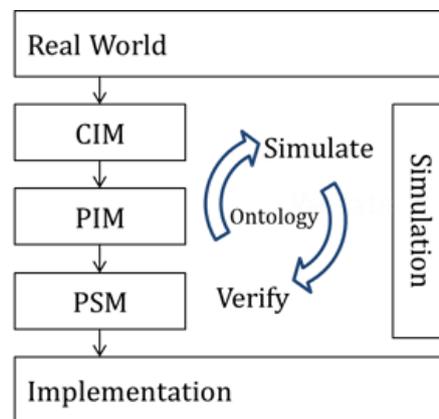


Figure 52. Combinaison de MDA et de la Simulation

La Figure 53 décrit un schéma de structure plus élaboré précisant l'échange d'informations. Le formalisme de l'échange d'informations et de partage entre les deux parties est représenté par l'utilisation d'ontologie. L'ontologie de l'échange d'informations a été nommée en anglais *Ontology of Information Exchange* (OoIE). Elle décrit les modèles MDA puis est envoyée du côté de la simulation pour aider à créer les modèles de simulation associés.

Pour créer les modèles de simulation, l'OoIE nécessite des informations supplémentaires, telles que les contraintes de temps et les limites séquentielles. Cette information sera ajoutée lors de la création des modèles de simulation. Les résultats attendus des modèles MDA seront eux décrits dans l'OoIE, afin de vérifier en retour si les modèles répondent aux exigences.

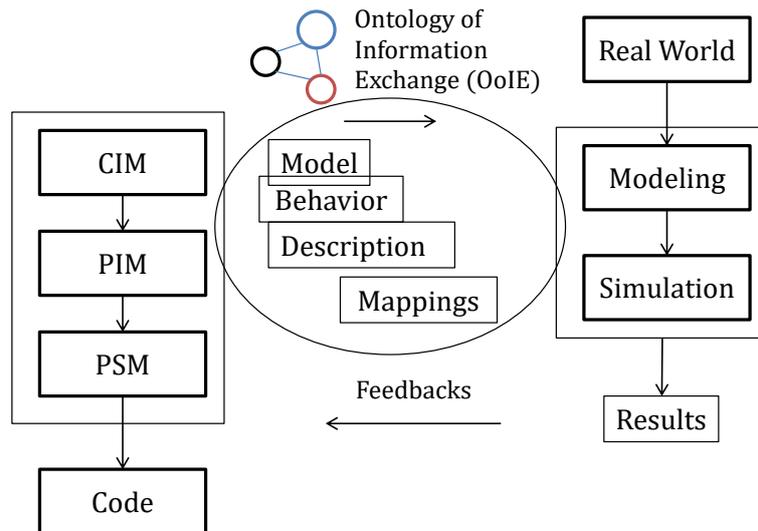


Figure 53. *Adaptation de la Structure de Simulation à MDA*

5.3.3.2 *Ontology of Information Exchange (OoIE)*

L'ontologie présente plusieurs avantages pour faciliter l'interopérabilité des modèles et l'échange d'informations. En particulier, la représentation sémantique structurée des concepts et de leurs relations permet le partage et l'échange de connaissances. Cette sémantique est rendue explicite et peut donc être traitée par les systèmes informatiques. Dans [R4], nous avons défini trois rôles que l'ontologie peut jouer pour contribuer à l'interopérabilité de la modélisation d'entreprise : la spécification des concepts, le partage des connaissances et l'annotation des concepts. Etant un type de support pour le partage des connaissances, l'ontologie joue un rôle efficace. Il existe plusieurs langages pour représenter les ontologies, qui peuvent être choisis en fonction des demandes particulières. Une enquête sur les langages de représentation des ontologies a été effectuée dans [R4] et [R5].

Dans les différents niveaux du processus MDA, les modèles sont créés pour représenter certains aspects des exigences. Chaque modèle est construit dans un langage de modélisation spécifique, comme l'utilisation de BPMN pour recueillir et analyser les besoins de l'entreprise au niveau CIM, l'utilisation de diagramme d'activité pour modéliser les principales fonctions impliquées dans le processus au niveau de PIM. OoIE vise à construire une représentation sémantique à un niveau générique pour décrire les principales préoccupations des modèles. L'ontologie du modèle MDA guidera la création des modèles de simulation. L'ontologie décrit principalement trois parties : le modèle lui-même, les descriptions et les mappages comme le montre la Figure 54.

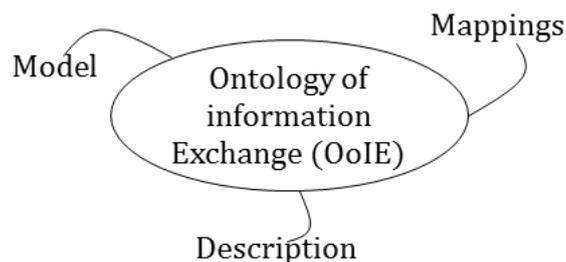


Figure 54. *Ontology of Information Exchange (OoIE)*

Les modèles issus de MDA, seront formalisés et représentés par l'ontologie en respectant le métamodèle. Les conditions requises pour créer les modèles seront ajoutés à l'OoIE. Les fonctions sont de deux ordres : 1) aider à créer des modèles de simulation, 2) vérifier la cohérence entre les exigences et les modèles construits. Les mappages sont pour l'alignement entre les modèles MDA et des modèles de simulation.

Le but de la construction des correspondances entre le modèle MDA et le modèle de simulation est de faciliter la transformation et la création des modèles de simulation. Le mappage sera réalisé sur la base de l'ontologie des modèles décrite dans [R4]. Une hypothèse est que les descriptions d'ontologies de l'ensemble des modèles MDA et des modèles de simulation sont préexistantes. La description d'ontologie est une représentation sémantique de modèles et de la réalité. Pour trouver les concepts équivalents entre l'ontologie source et l'ontologie cible, plusieurs niveaux et différents aspects sont étudiés. Les mappages sont mis en place par mesure de similarité entre les différents concepts de l'ontologie, et la mesure est basée sur des algorithmes et des règles. Nous avons présenté dans [R5] une approche basée sur des stratégies de correspondances multiples des ontologies. Dans cette approche, présentée section 4.4, plusieurs algorithmes de correspondance sont combinés par un processus analytique AHP en équilibrant le poids de chaque adaptateur. Après avoir obtenu les correspondances entre les concepts équivalents, la création de modèles de simulation serait facilitée par la compréhension des liens entre les modèles.

5.3.3.3 Adaptation des Modèles

Avec l'aide de l'OoIE, une structure générale d'adaptation des modèles est illustrée par la Figure 55. L'ensemble du processus est démarré à partir des modèles MDA, et seulement une partie des modèles sera prise en compte. En raison de la nature des modèles, il est entendu que seuls les modèles de MDA aillant une « capacité » à fournir des informations sur la dynamique du système pourront être adaptés en modèles de simulation. La principale différence entre les modèles dynamiques et statiques reste de savoir si le modèle tient compte de comportements en exécution d'un système dans le temps ou pas. L'expérience tend à montrer que les modèles statiques de MDA ne comprennent que peu d'éléments de comportements et de données temporelles, de sorte que ce type de modèles devra être complété par une nouvelle étape de collecte d'information auprès des spécificateurs pour enrichir le modèle.

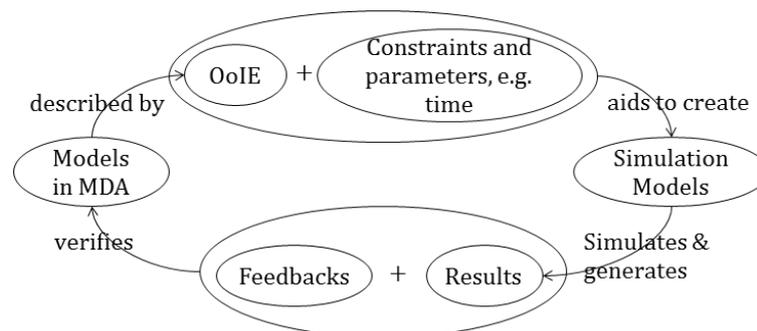


Figure 55. Adaptation du Modèle entre MDA et la Simulation

L'OoIE décrit l'ontologie des modèles MDA. Des informations supplémentaires seront nécessaires afin d'aider à créer des modèles de simulation. L'OoIE décrit principalement les données et les comportements produits de MDA, cependant, pour s'adapter à des modèles de simulation spécifiques, les contraintes et les paramètres doivent être complétés, telles que la limitation de temps et des exigences séquentielles. Ce procédé est différent de la

transformation de modèles. La transformation de modèles est un processus de mappage rigoureux permettant de transformer les éléments de modèles sources vers une structure cible. L'ensemble du processus peut être automatique. Toutefois, dans ce processus, le modèle d'adaptation nécessite un mappage souple entre les modèles MDA et les modèles de simulation, et ce processus nécessite un travail humain d'ajustement.

Les modèles de simulation vont générer des résultats de simulation après l'exécution. Afin de vérifier si les modèles sont exécutés comme prévu, les résultats obtenus sont comparés avec les résultats attendus, qui sont décrits dans OoIE. Les résultats sont sous deux formes : le résultat d'exécution général des modèles, (le comportement spécifique généré et les états atteints) et le résultat d'arrivée. Les modèles ne peuvent pas systématiquement produire des résultats généraux de toutes les situations d'utilisation des modèles. Les résultats varient en fonction des différents scénarios. Dans chaque cas, un scénario spécifique et les résultats escomptés sont décrits dans OoIE.

Les résultats de la vérification sont envoyés vers le côté MDA. Les différences ou les objectifs non atteints seront également notées, de sorte à améliorer les modèles. Si les résultats de la validation ne parviennent pas à un niveau satisfaisant, des itérations seront effectuées.

5.3.4 Démonstration

Une première étude de cas a été réalisée pour illustrer l'idée et la méthode proposée dans [C7]. Dans ce cas d'étude, le premier scénario est réalisé dans le domaine de la fabrication. Au niveau du PIM en MDA, un graphe d'états est créé. Puis, afin de vérifier et améliorer le modèle à états généré, nous suivrons la méthodologie décrite dans les sections ci-dessus.

5.3.4.1 Scénario

Dans la fabrication de produits, le traitement des commandes est une exigence ordinaire. Dans MDA, après la collecte des besoins au niveau CIM, le client veut se concentrer sur le changement d'état du traitement de la commande au niveau PIM avec un diagramme d'états. Les exigences sont décrites comme suit :

L'état des commandes passe de « initial » à « commandé » après la sélection des produits. Puis le système vérifie le stock, si le produit est en rupture de stock, la commande sera annulée et le processus de commande est terminé. Si le produit est disponible, alors l'ordre attend le paiement de l'utilisateur. Après que l'utilisateur ait payé la commande, le gestionnaire vérifie (manuellement ou automatiquement) le paiement. Si le paiement est reçu correctement, alors la commande est confirmée et le stock se prépare à livrer le produit. Si le paiement n'est pas reçu correctement, alors l'ordre de commande passe à l'état « en attente de paiement ». L'utilisateur peut annuler la commande après la commande des produits et avant que les produits soient livrés.

Un modèle de données de commandes est décrit sous forme d'ontologie dans la Figure 56. Selon la description de scénario, le modèle est créé dans OWL (Šváb-Zamazal & Svátek, 2011), qui est un langage d'ontologie standard et qui est largement utilisé pour décrire des modèles dans MDA. Ce modèle illustre la connaissance du changement d'état de la commande.

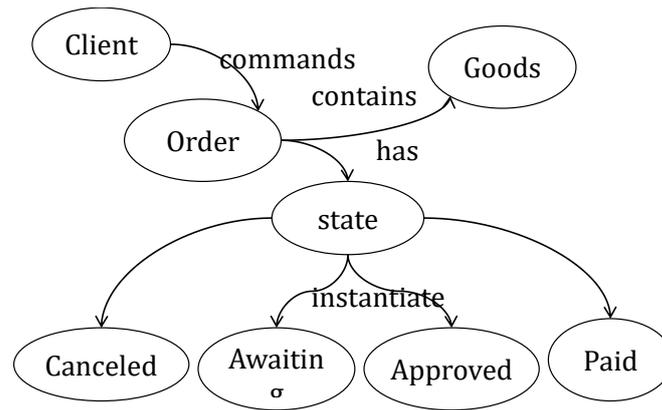


Figure 56. *Modèle de Données de l'Etat d'une Commande dans OWL*

Une version du graphe d'états est créée conformément à la description ci-dessus comme le montre la Figure 57. Maintenant, la demande pour vérifier si le modèle correspond aux exigences est exigée.

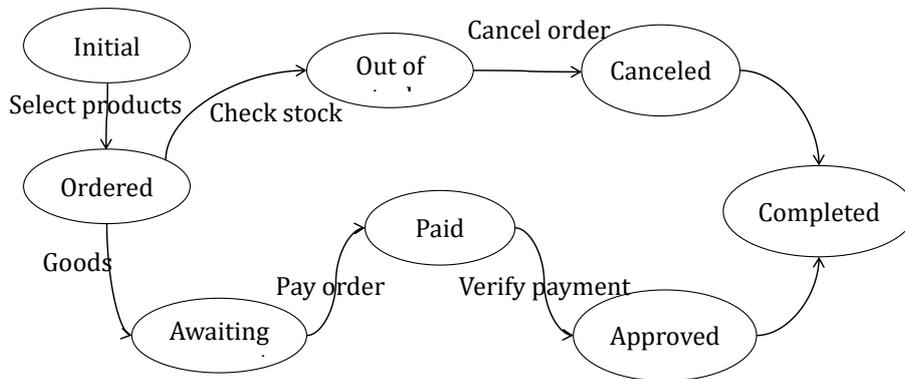


Figure 57. *Modélisation du Diagramme d'Etats du Processus de Commande*

5.3.4.2 Adaptation de Modèles

Dans cette section, une ébauche d'un métamodèle de graphe d'états est décrite, puis les correspondances entre les deux modèles dans différents langages de représentation sont représentées. Les concepts découverts sont utilisés dans les modèles de simulation.

5.3.4.2.1 Modèle de Données

La description de métadonnées de diagramme d'états peut être effectuée de différentes manières, (Favre, 2010) décrit un modèle de métadonnées de graphe d'états. Une ontologie simplifiée est utilisée pour décrire le graphe d'états comme le montre la Figure 58. Le modèle commence par un état initial et se termine par un état final, entre ces deux états, le modèle comporte des états itératifs et des transitions.

Les séquences possibles de transition d'état issus de modèle de la **Figure 58** sont les suivantes :

- 1) Initial- Ordered-out of stock- canceled- completed;
- 2) Initial- Ordered- Awaiting payment- paid- confirmed- delivered- completed.

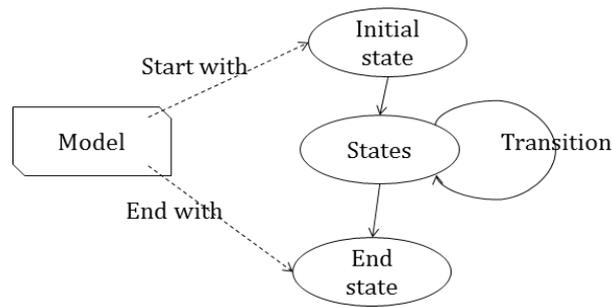


Figure 58. Description d'un Diagramme d'Etats Simplifié

5.3.4.2 Mappage

Pour aller plus loin dans la connexion entre les ontologies et le monde de la simulation, nous avons proposé de lier le modèle de données ontologique avec le système *System Entity Structure* (SES). La Figure 59 montre l'utilisation d'un modèle existant à côté d'une simulation. SES est présenté par (Zeigler & Hammonds, 2007), il joue le rôle de cadre de l'ontologie et de médias d'échange de l'information. Il permet de décrire le changement statique et dynamique de l'état dans la modélisation et simulation avec le formalisme DEVS.

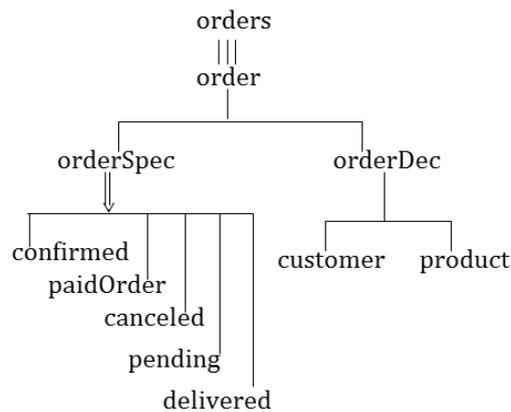


Figure 59. Modèle de Données de l'Etat d'une Commande Décrit en SES

La deuxième étape consistera à trouver des correspondances entre le modèle SES (Figure 59) et le modèle en OWL (Figure 56). Cette étape permettra de trouver des concepts correspondants entre deux modèles de données. La méthode d'appariement développée dans le cadre de la thèse de Fuqi Song [T2] [R4] et [R5] pourra être utilisée.

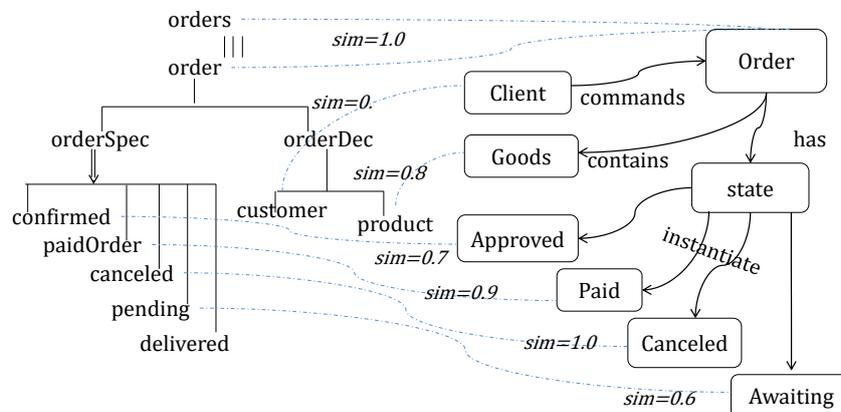


Figure 60. Alignement de deux Modèles de Données

Dans l'exemple présenté en Figure 60, la partie gauche est au format SES et la partie droite est en OWL, et les découvertes des alignements sont marquées en pointillés avec une valeur de similarité. Cette similarité mesure les similitudes entre deux concepts en termes de sémantique. Par exemple, la similarité entre « en attente » et « attente » est de 0,6, et « paidOrder » et « payé » est de 0,9. Les correspondances découvertes sont également répertoriées dans le Tableau 10. Le seuil de similitude est défini comme $th = 0,5$ manuellement, de ces correspondances, dont la valeur de similarité est supérieure à 0,5, ils seront utilisés. Les concepts équivalents doivent être appliqués dans les modèles de simulation.

Tableau 10. *Correspondances Découvertes*

| Model in OWL | Model in SES | Sim. |
|--|----------------------------------|------|
| order | order/orders | 1.0 |
| client | customer | 0.8 |
| approved | confirmed | 0.7 |
| paid | paidOrder | 0.9 |
| awaiting | pending | 0.6 |
| canceled | canceled | 1.0 |
| - | delivered/ orderSpec/orderDec | - |
| state/commands/ contains has/instantiate | - | - |

5.3.4.3 Vérification et Améliorations

Les outils de simulation et les langages peuvent faciliter cette étape. (Wood, et al., 2008) utilisent le langage VHDL pour représenter le diagramme UML d'Etat. Au stade actuel, nous simulons le processus en utilisant le logiciel LSIS_DME [R8] [C18] et (Baati, et al., 2007) qui permet de créer des modèles G-DEVS graphiques (Song & Kim, 1994). Une vue d'écran est présentée en Figure 61. Le modèle DEVS généré doit être défini par les aspects temporels du modèle, en particulier, la durée de vie de chaque état est représentée dans le modèle de simulation DEVS.

Selon les métadonnées du modèle de diagramme d'état présenté dans la Figure 57 et la description de l'exigence, la séquence de changements d'état réel est comme suit, où [xxx]* se réfère à une boucle:

1. Initial-Ordered -canceled-completed
2. Initial- Ordered- [pending- paidOrder]*- canceled- completed
3. Initial- Ordered-[pending- paidOrder]*- confirmed- canceled- completed
4. Initial-Ordered- [pending- paidOrder]*- confirmed- delivered- completed

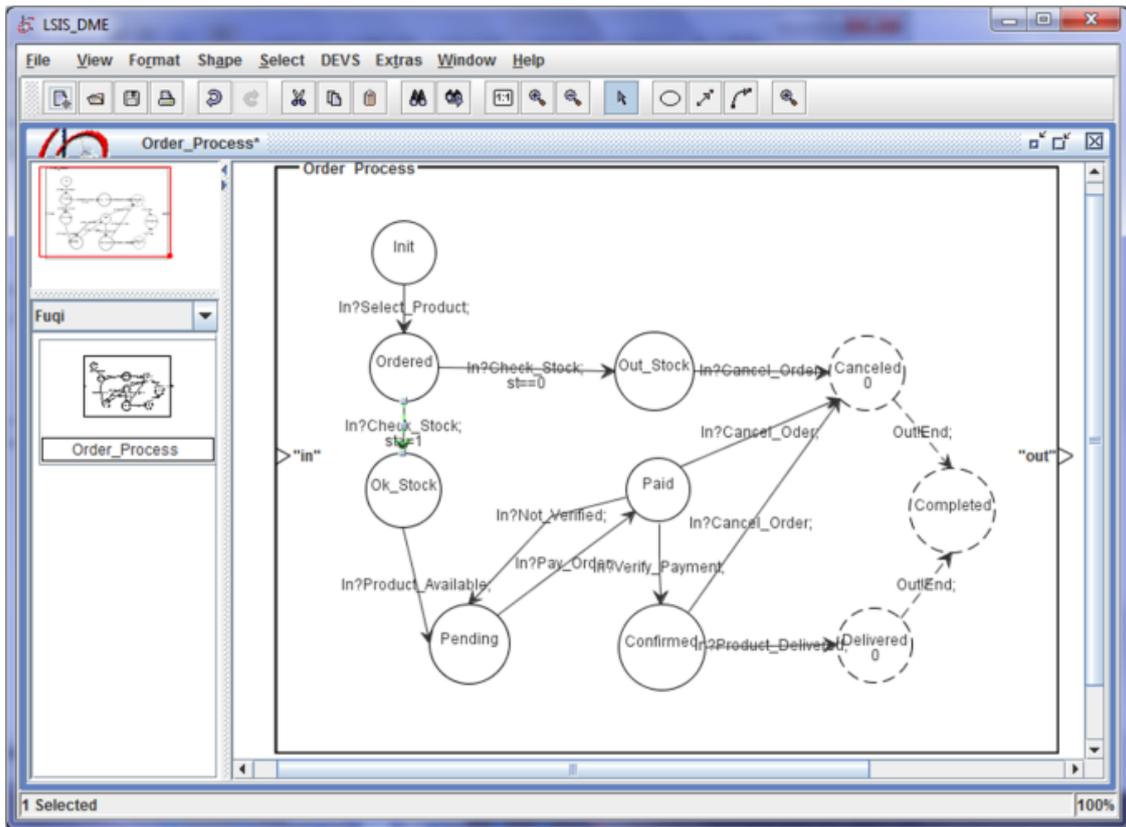


Figure 61. Capture d’Ecran du Modèle de Commande Simulé avec LSIS_DME

En comparaison avec les séquences, qui sont décrites dans la première version du tableau de modèle de l’État (voir la Figure 57 Figure 58), un modèle amélioré est donné à la Figure 62. La ligne pointillée désigne les entités ajoutées. Les améliorations sont les suivantes:

1. Remove the state "out of stock";
2. Add state "delivered";
3. Add transition between "paidOrder" and "Pending";
4. Add transition between "paidOrder" and "canceled";
5. Add transition between "confirmed" and "canceled".

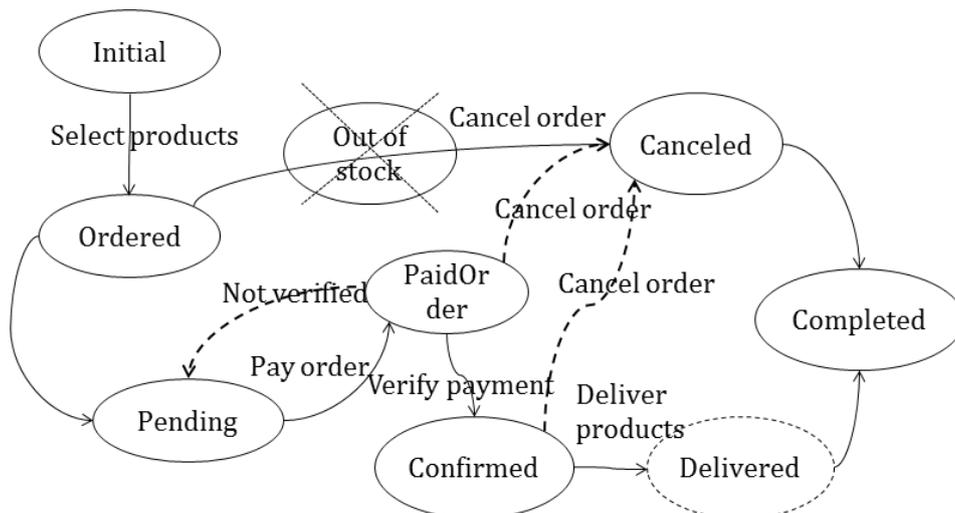


Figure 62. Diagramme d’Etats Amélioré du Processus de Commande

5.3.5 Discussion

Il existe peu de travaux sur la combinaison MDA et les modèles de simulation. Dans (El Haouzi, 2006), l'auteur propose une méthode combinant MDA et HLA pour améliorer les lacunes des méthodes de simulations actuelles au niveau de l'interopérabilité et de la réutilisabilité. (Cortellessa, et al., 2007) étendent le cadre MDA au domaine non-fonctionnel pour permettre la génération de modèles non fonctionnels. Le cadre élargi permet de vérifier les exigences des modèles. Les travaux proposés dans cette section diffèrent des deux méthodes ci-dessus. Ils proposent d'exécuter les modèles pour obtenir une rétroaction potentielle en comparant les résultats aux besoins prévus. Le travail propose une méthodologie générique combinant MDA et un processus de modélisation et simulation parallèle. Dans le processus d'adaptation, l'ontologie joue un rôle clé en tant que moyen d'échange d'information.

Les auteurs (Benjamin & Akella, 2009) (Benjamin, et al., 2007) appliquent les ontologies en tant que médias d'échange d'informations pour permettre l'intégration et l'interopérabilité des modèles de simulation. Dans l'approche, trois types d'ontologie sont extraits et créés : une ontologie de domaine, une ontologie de Communauté d'Intérêts (CI) et une ontologie d'outil de simulation. L'ontologie CI construit un pont de concepts et de connaissances entre les modèles de simulation et la connaissance du domaine commun, *in fine*, pour permettre la communication et l'interopérabilité des modèles. L'ontologie est également adoptée comme moyen d'échange de l'information dans l'approche de cette perspective. Cependant, son but est de permettre le partage de connaissances entre MDA et la modélisation de simulation. Nous pourrions appliquer une ontologie descriptive du modèle de simulation pour améliorer la sémantique dans la simulation. Par exemple, Silver et al. (Silver, et al., 2011) proposent « *Discrete-event Modeling Ontology* » (DeMO) afin d'améliorer la recherche sémantique et l'intégration des sources d'informations hétérogènes.

5.3.6 Conclusion et Travaux Futurs

Dans cette section et dans [C7], nous avons décrit une proposition de méthodologie générique pour adapter les modèles de MDA en modèles de simulation pour la vérification des modèles en respectant des exigences contextuelles. Cette méthodologie vise à compléter et enrichir le processus MDA. La combinaison MDA et simulation pourra contribuer à la vérification de modèles au niveau de l'exigence temporelle. L'application de l'ontologie pour l'échange et le partage d'informations permettra de fournir une relation sémantique souple entre les modèles et la simulation.

Au stade actuel, nous avons initié la définition d'une méthodologie comme cadre générale. Nous avons aussi donné une démonstration typique d'illustration. Les perspectives sont portées dans un horizon de 5 ans. La thèse de Wang Yan [T5] vient de démarrer dans la continuité de ces travaux en Septembre 2014. Nous nous efforcerons avec ce doctorant de nous concentrer principalement sur l'élaboration de la méthode et de donner des mesures d'application opérationnelles, permettant également d'automatiser le processus. Tout d'abord, les règles et le formalisme d'OoIE devront être définis. Ensuite, cette ontologie spécifique pourra varier en fonction des modèles et différents types d'ontologie pour ces différents modèles seront définis. Puis, le moyen d'échange d'informations entre les deux parties devra être élaboré par la définition détaillée d'une interface et d'un format. Enfin, la méthode et le critère de vérification seront élaborés afin de permettre la vérification automatique.

5.4 M&S de réseaux sociaux

5.4.1 Introduction

Ce nouveau champ de recherche nous permet d'initier des travaux orientés sur le comportement humain et les réseaux sociaux, qui deviennent les clefs d'un grand nombre de scénarios prospectifs pour les entreprises futures (FINES, 2012). Ces travaux ont été démarrés en novembre 2013 dans le cadre de la thèse de Youssef Bouanan [T4], co encadrée avec Bruno Vallespir, et du stage de Master de Merouane Bouhamidi El Alaoui [M6] [C1] (2014). Ils sont supportés par le projet DGA RAPID SICOMORES. Ce travail de construction de modèle de comportement et de réseaux sociaux civilo-militaire pourra être transposé dans le milieu industriel selon les objectifs FINES : « *Humanistic Enterprise* » et « *Community-oriented Enterprise* » qui demandent de placer l'acteur humain au centre des préoccupations et d'étudier son implication dans différents réseaux sociaux. Cette perspective se décompose en deux périodes. Le projet permet, dans les 3 années à venir, de trouver un premier domaine applicatif aux modèles et simulations et de valider par un cas d'étude avec des résultats au périmètre de l'étude DGA. Dans un deuxième temps, nous généraliserons et transposerons ces travaux au secteur de l'entreprise en réseaux, à horizon 5 ans.

Le GDR MACS (Grabot & Collectif, 2012) identifie et place, dans le cadre de scénarios prospectifs de rupture, l'humain et son implication sociale comme « intégrés » au processus. Néanmoins, le facteur humain reste peu impliqué dans les modèles de simulation. En particulier, les réactions d'une population à la diffusion et à la propagation de l'information sont, jusqu'à présent, pas ou peu modélisées de manière appropriée. Il existe cependant un grand intérêt dans la possibilité de simuler et mesurer avec précision l'impact d'une information sur une population. Nous avons pris part au projet DGA RAPID SICOMORES dont l'objectif est de fournir des solutions pour générer artificiellement des réseaux sociaux structurés de populations réalistes et simuler les effets de l'information sur la population, avec un algorithme de propagation des effets à travers les réseaux. L'intention est d'aller plus loin que les modèles actuels qui réduisent généralement les individus d'une population à de simples obstacles/transmetteurs d'informations sans suffisamment nuancer leur comportement et l'influence qu'ils peuvent avoir sur un message. Cette nouvelle perspective de travail permet donc d'aborder un nouveau champ d'utilisation de la simulation où les concepts d'interopérabilité et l'approche sémantique pourront s'exprimer pleinement. Elle a aussi pour objectif de mettre en œuvre les principes de modélisation des agents introduits en 4.2.4, ainsi que nos propositions de transformations de modèles et de simulations distribuées afin de mesurer l'impact des activités d'influence sur les individus dans les réseaux.

La première action consiste à sélectionner un langage permettant de représenter un individu, son comportement et enfin son appartenance à des réseaux (sociaux et géographiques). Il apparaît intéressant de combiner des automates cellulaires et des graphes pour la représentation spatiale et sociale avec un formalisme type à événements discrets pour le comportement des individus. Plusieurs langages sont à l'étude, tels que les SMA ou, en particulier, le langage Cell-DEVS² qui permet la modélisation de systèmes complexes de réseaux sociaux. Il sera nécessaire de prendre en compte plusieurs couches de graphes sociaux liés à un ou des réseaux géographiques. De manière plus détaillée, cette perspective de travail va participer à la définition d'un ensemble de modèles qui répondront à la définition d'entités, à la structuration de la population et aux mécanismes de diffusion d'une information. Dans la

² Nous avons obtenu l'invitation du Professeur Gabriel Wainer spécialiste de Cell-DEVS par un financement des Initiatives d'Excellences (IDEX) de l'Université de Bordeaux pour la période Février 2015

suite, un état de l'art non exhaustif de M&S présente des techniques capables de décrire un système social à plusieurs niveaux, y compris les systèmes multi-agents (SMA) et les approches de modélisation à événements discrets. Les modèles des individus et des groupes d'individus seront caractérisés par un ensemble de variables d'état (par exemple, l'aide de la pyramide de Maslow pour construire le comportement d'un individu) et le maillage entre les individus au sein d'un réseau social.

5.4.2 Rappel Cell-DEVS

Le formalisme Cell-DEVS (Wainer, 2009) est une spécialisation du formalisme DEVS, en permettant la mise en œuvre de modèles cellulaires avec des retards de synchronisation. Il améliore les performances d'exécution des modèles cellulaires en utilisant une approche à événements discrets. Il améliore également la définition du comportement de la cellule en le rendant plus expressif. Chaque cellule est définie comme étant un modèle atomique DEVS en utilisant des retards de synchronisation avec les durées de vies internes. Par la suite ce modèle peut être intégré à un modèle couplé DEVS représentant un espace de la cellule, comme montré sur la Figure 63.

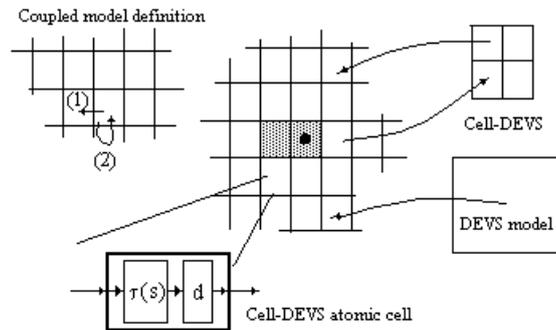


Figure 63. Description Informelle de Cell-DEVS

Une fois que le comportement de la cellule est défini, un modèle Cell-DEVS couplé peut être créé en reliant un certain nombre de cellules interconnectées avec leur voisinage. Un modèle cellulaire est un réseau de cellules contenant des variables d'état et une logique de calcul, qui est en charge de la mise à jour de l'état de la cellule selon une règle locale. L'état d'une cellule considérée est mis à jour à partir d'un ensemble fini N de cellules voisines.

Chaque cellule utilise les N apports pour calculer son prochain état. Ces entrées, qui sont reçues par l'interface du modèle, activent une fonction de calcul locale (t). Un retard (d) peut être associé à chaque cellule. Les changements d'état (s) peuvent être transmis à d'autres modèles, mais seulement après la consommation de ce retard. Deux sortes de retards peuvent être définies : les retards de transport qui modélisent un temps de déplacement variable (chaque changement d'état est transmis), et les retards d'inertie, qui ont une sémantique de préemption (événements programmés pouvant être rejetés).

5.4.2.1 Outils de Simulation Cell-DEVS

Plusieurs logiciels de modélisation et simulation DEVS et Cell-DEVS coexistent. Nous avons présentés certains outils dédiés à DEVS dans la section 4.6.7.2.2. Dans cette section nous nous focalisons sur les outils permettant la modélisation Cell-DEVS.

L'étude a débuté par le logiciel CD++ (Wainer, 2002). Nous avons assimilé les caractéristiques de base de l'outil à partir d'un exemple d'application et ainsi vérifié son adéquation avec notre besoin pour la représentation de réseaux sociaux. Le logiciel CD++ est une boîte à outils de modélisation et de simulation qui implémente DEVS et Cell-DEVS. Les modèles atomiques peuvent être définis en utilisant une approche basée sur l'état (codé en C++ ou une notation graphique interprétée), tandis que les modèles couplés et Cell-DEVS sont définis en utilisant un langage de spécification intégré. Il existe une bibliothèque de modèles présentée dans (CELL-DEVS Collectif, 2013). CD++ comprend également un interprète pour les modèles Cell-DEVS. La spécification du modèle comprend la définition de la taille et la dimension de l'espace cellulaire, la forme du quartier et les frontières. La fonction locale de calcul de la cellule est définie par un ensemble de règles de la forme : {POSTCONDITION} {DELAY} {PRECONDITION}. Celles-ci indiquent que lorsque la condition est satisfaite, l'état de la cellule va changer à la « postcondition » désignée, dont la valeur calculée sera transmise à d'autres composants après avoir consommé le retard.

Cette étude n'est pas exhaustive et d'autres logiciels seront prochainement testés. En particulier le logiciel VLE (Quesnel, et al., 2012) est actuellement évalué.

5.4.3 Modélisation du Comportement Humain

5.4.3.1 Approche Générale

La modélisation du comportement humain devient un domaine de plus en plus important en science et en informatique avec des applications non seulement pour les sciences sociales, mais aussi pour l'économie, l'épidémiologie et d'autres domaines. La littérature scientifique abonde en concepts hétérogènes, hautement spécialisés, théories fondées de la cognition humaine, des émotions et d'autres aspects du comportement. Il existe de nombreuses lignes de recherche sur ces modèles, qui couvrent plusieurs disciplines, qui ont des objectifs différents, et qui souvent utilisent des terminologies et approches différentes. La modélisation du comportement humain ou la représentation du comportement humain (*Human Behaviour Representation*, HBR) est un domaine d'étude important dans la recherche militaire (Fei, et al., 2007), la robotique (Kubota & Nishida, 2006), les interfaces cerveau-ordinateur (Brain-Computer Interface, BCI), les interfaces homme machine (HMI) (Ding, et al., 2009) et les études d'anthropologie. Les modèles de comportement humain sont souvent représentés par des machines à états finis, des règles, des règles floues (Dorsey & Coover, 2003), des réseaux de neurones artificiels, ou une modélisation basée sur les systèmes multi-agent (Sun, 2007) (Ören, et al., 2007). Les différents domaines de connaissance nécessaires pour représenter le comportement humain se fondent sur plusieurs paradigmes. Nous trouvons donc ici un domaine d'application à l'interopérabilité des modèles, leurs transformations et leurs simulations distribuées, ainsi que l'interaction avec les services.

5.4.3.2 Utiliser DEVS pour la Modélisation du Comportement Humain

Le comportement humain est absolument difficile à comprendre, à décrire et à prévoir, il peut donc être qualifié de système complexe et donc étudié en tant que tel. Il n'est actuellement pas possible de prétendre décrire un comportement humain précis et complet. L'idée est d'essayer de représenter le comportement d'un individu, très stéréotypé. Cependant, s'il est reproduit sur une population avec une approche statistique, le comportement global de la simulation peut donner une estimation plausible. Par ailleurs, DEVS est un formalisme qui présente des atouts par rapport aux autres formalismes pour la modélisation de ce type de système dynamique complexe. Sa capacité d'abstraction, la notion

5.4.4 Utilisation de CELL-DEVS pour simuler la propagation d'information

5.4.4.1 De la Diffusion Epidémiologique vers la Diffusion d'Information

Les phénomènes de propagation de l'information ont suscité un grand intérêt de recherche, notamment en sciences sociales et médicales. Ils redeviennent un domaine de recherche très actif avec l'émergence des réseaux sociaux électroniques (Bakshy, et al., 2011). Dans le passé, la propagation a été notamment étudiée dans le domaine épidémiologique (Diekmann & Heesterbeek, 2000) pour mieux comprendre le processus de propagation de l'infection sous certaines conditions. Par conséquent, la majorité des travaux récents relatifs à la diffusion de l'information sont basés sur les recherches épidémiologiques. Nous avons proposé dans [C1] et [C3] une analogie de base (Tableau 11) entre la diffusion de l'information au sein d'un groupe d'individus et la transmission de maladies infectieuses entre les individus. Dans les deux cas, une information est communiquée par un contact donné.

Tableau 11. Paramètres du Modèle épidémiologique Transposés à la Diffusion d'Information

| | Epidémiologie | Diffusion d'Information |
|-------------------|---|---|
| N | Nombre de sujets | Nombre de personnes |
| S(t) | Nombre de personnes sensibles au temps t | Nombre de personnes sensibles au temps t |
| I(t) | Nombre de personnes infectieuses à l'instant t | Nombre de personnes à l'instant t qui transportent l'information |
| X | Contacts par unité de temps et par individu | Contacts par unité de temps et par individu |
| β | La probabilité de transmission entre un contact infecté et un exposé | La probabilité de transmission d'un contact titulaire d'information vers un receveur |
| a = βx/N | Taux de contagion | Taux de personnes atteintes par l'information |
| α = a*I(t) | Force de l'infection: la probabilité susceptible par unité de temps de devenir infectieux | Force de transmission: La probabilité par unité de temps pour un nœud de recevoir l'information |

5.4.4.2 Une première Implémentation en CELL-DEVS

La Figure 65 décrit les étapes de procédure d'exécutions du modèle en CD ++. Nous avons utilisé et adapté selon la transposition décrite dans le Tableau 11 un modèle existant de propagation épidémiologique de virus défini avec CELL-DEVS par (Shang & Wainer, 2005).

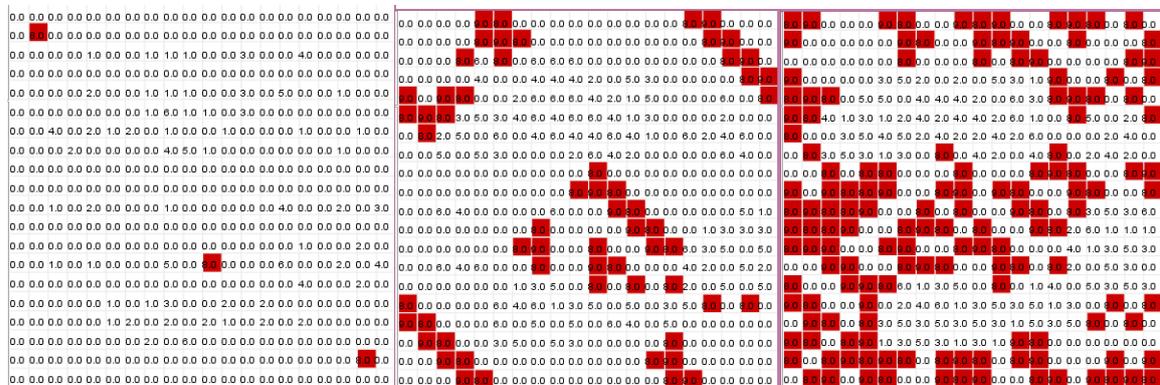


Figure 65. Résultats d'Exécution aux Temps : 00:00:00:000; 00:00:00:500; 00:00:01:000

Ce modèle est destiné à étudier la propagation de l'information au sein d'un groupe d'individus. Considérons une matrice 20×20 d'automates cellulaires. Chaque individu, demeurant sur un nœud (i, j), est représenté par des variables décrivant ses paramètres de Maslow, l'appartenance à un réseau social et l'opinion de l'individu. Dans notre interface, chaque cellule affiche l'une des deux catégories : une personne qui n'a pas reçu l'information représentée en blanc; une personne qui a reçu représentée en rouge. La situation initiale, bloc gauche Figure 65, présente trois individus sources d'une même information. Les individus pouvant être opposés à l'information et/ou à la personne qui émet le message et/ou favorable à l'émetteur et au contenu du message. Les résultats de simulations, bloc droit de la Figure 65, font état, en fonction de l'opinion des individus et de la configuration des réseaux sociaux, que certains individus ont pu être atteints par l'information alors que d'autres, du fait de leur position géographique, sociale et de leur opinion n'ont pas été affectés par l'information. Ce test, très simple, est basé sur la situation géographique abstraite d'individus et il ne prend en compte qu'une seule dimension d'un réseau social. Nous n'avons pas encore, en l'état de nos travaux, introduit une représentation permettant de définir les liens entre plusieurs niveaux de réseaux sociaux reliant les individus ou les groupes. Néanmoins l'approche valide déjà la possibilité de réutiliser un algorithme épidémiologique pour diffuser l'information.

5.4.5 Conclusion

Cette perspective de recherche pose les bases d'utilisation de la modélisation formelle et de la simulation pour analyser l'impact de l'information sur les individus dans les réseaux sociaux. Nous avons initié la façon dont DEVS et Cell-DEVS pourraient être utilisés pour la M&S de l'influence sociale. Au niveau individuel, le modèle DEVS proposé est très simple et utilise les paramètres basiques de Maslow comme seules variables d'état simplement influencées par l'arrivée des messages. A son tour le modèle individuel peut transmettre le message après l'avoir éventuellement transformé en fonction des critères. La structure Cell-DEVS peut utiliser des modèles de comportement humain extrêmement simplifiés sur chaque nœud et peut construire au-dessus des modules connectés pour former un réseau Cell-DEVS. La séparation du modèle et du simulateur suivie par DEVS et CD++, a permis de nous concentrer sur la construction du modèle comportemental d'un côté et la préparation de la logique de couplage de l'autre côté à l'aide de la boîte à outils CD++. Le modèle démontre une bonne réaction, même extrêmement simplifiée, du comportement humain pour la perception et le traitement des informations. Ensuite, la diffusion d'informations en réutilisant les approches épidémiologiques semble suffisamment précise après quelques adaptations pour propager les informations sur le réseau de façon réaliste.

La perspective principale de recherche reste la définition d'un réseau social à plusieurs niveaux. Un réseau social réel est complexe et multi-vues, il peut contenir, par exemple l'environnement familial, professionnel, amical ou encore confessionnel, mais également la géographie afin de définir des proximités temporaires sur des lieux de regroupement pour véhiculer l'information d'un individu à l'autre. Notre première perspective porte sur un horizon court de 3 ans, dans le cadre de la thèse de Youssef Bouanan [T4], qui devra nous permettre de combiner hiérarchiquement plusieurs réseaux. L'agrégation de ces différents réseaux sociaux pour définir des canaux de communication entre les individus reste un thème de recherche peu exploré. La prochaine étape, au-delà du projet, nous permettra de considérer et transposer ces travaux à d'autres terrains d'expérimentation. En particulier les entreprises futures sont en attente de la prise en considération du facteur humain dans les décisions et la diffusion d'informations ; qui demeure une préoccupation prioritaire dans (FINES, 2012). Nous sommes, par ailleurs, d'ores et déjà sollicités par des organismes de valorisation pour transposer l'utilisation de ces modèles aux réseaux électroniques.

5.5 Découverte de Modèles

5.5.1 Introduction

Les travaux décrits ci-après se placent dans la continuité de la démarche de *reverse engineering* développée dans la thèse de Zhiying Tu [T1]. Les démarches de rétro ingénieries sont un thème porteur lié aux approches système de systèmes (SoS). D'ailleurs, les conclusions du rapport du Comité d'Experts Productique du CNRS (FUTURPROD, 2013) y font clairement référence. Dans un SoS, tout nouveau système est développé pour être utilisé dans un contexte plus général souvent en lien avec d'autres composants déjà existants. La partie découverte de modèles comportementaux est une des perspectives de nos travaux. Nous avons jusqu'à présent principalement pu découvrir des objets, leurs structures et fonctions en faisant références aux travaux de Jean Bezivin (Bézivin, et al., 2005) ; la partie dynamique et le comportement des objets restant jusqu'à présent complexe à appréhender.

Nous avons posé quelques bases dans le cadre des travaux de fin de thèse de Zhiying Tu [T1] et du stage de Master de Wei Du [M3] (2013). Cependant ces travaux porteurs n'en sont qu'aux balbutiements. L'horizon d'avancement est à planifier sur les 10 prochaines années du fait de la jeunesse de la thématique et des prochaines avancées dans les thèses à démarrer.

5.5.2 Génération de Modèles Comportementaux

Avant d'expliquer comment générer un modèle de comportement, il est nécessaire de déterminer le niveau de détail du modèle de comportement souhaité. Par exemple, si le modèle de comportement est utilisé uniquement pour la description de la logique générale du système, à savoir les relations principales d'entrée / sortie. Dans ce cas, une machine à états pourrait être suffisamment qualifiée pour représenter ce comportement. Toutefois, si le modèle de comportement est utilisé pour représenter le maillage et l'interopérabilité des processus et des SI de l'entreprise avec ses multiples connexions, une machine à états s'avère insuffisante pour décrire les détails des processus d'affaires et les synchronisations interprocessus. Dans ce cas, le modèle de comportement devrait faire appel à un modèle qui puisse formaliser la logique détaillée, comme, par exemple, un modèle BPMN ou DEVS.

Nous avons proposé, dans la thèse de Zhiying Tu [T1] (section §4.3.3), un adaptateur qui est une interface simplifiée qui simule la dynamique logique des processus d'un système existant. Il s'agit d'une interface qui est chargée de traiter les demandes des fédérés venant du RTI, et de préparer l'entrée du système existant. Selon la complexité de la demande, il peut réagir immédiatement ou indirectement en invoquant le sous-système local du système correspondant existant. Ainsi, la machine à états peut décrire une logique de système qui est en général suffisante pour guider la génération de l'adaptateur HLA. Par conséquent, cette perspective s'efforcera dans une première étape d'introduire une méthode pour générer une machine à états à partir des chemins d'exécution de système réduits.

Le flux de contrôle d'une machine à états dépend d'une séquence d'événements. Supposons que chaque état soit lié au moins à une paire d'évènements reçus/envoyés. Quand un système reçoit un événement, il exécute des actions internes qui vont changer son état en fonction de l'exécution de l'évènement. Le changement d'état va à son tour déclencher un événement envoyé qui deviendra l'évènement reçu d'un autre modèle. Selon cette description, le graphe orienté d'appel de classes présenté dans la Figure 66 partie 1 pourrait être transposé dans le diagramme d'états présenté dans la Figure 66 partie 2. Chaque nœud représenterait un état, et chaque arc un événement. Cependant, ce diagramme d'états serait en utilisation réelle très verbeux et demandera être optimisé.

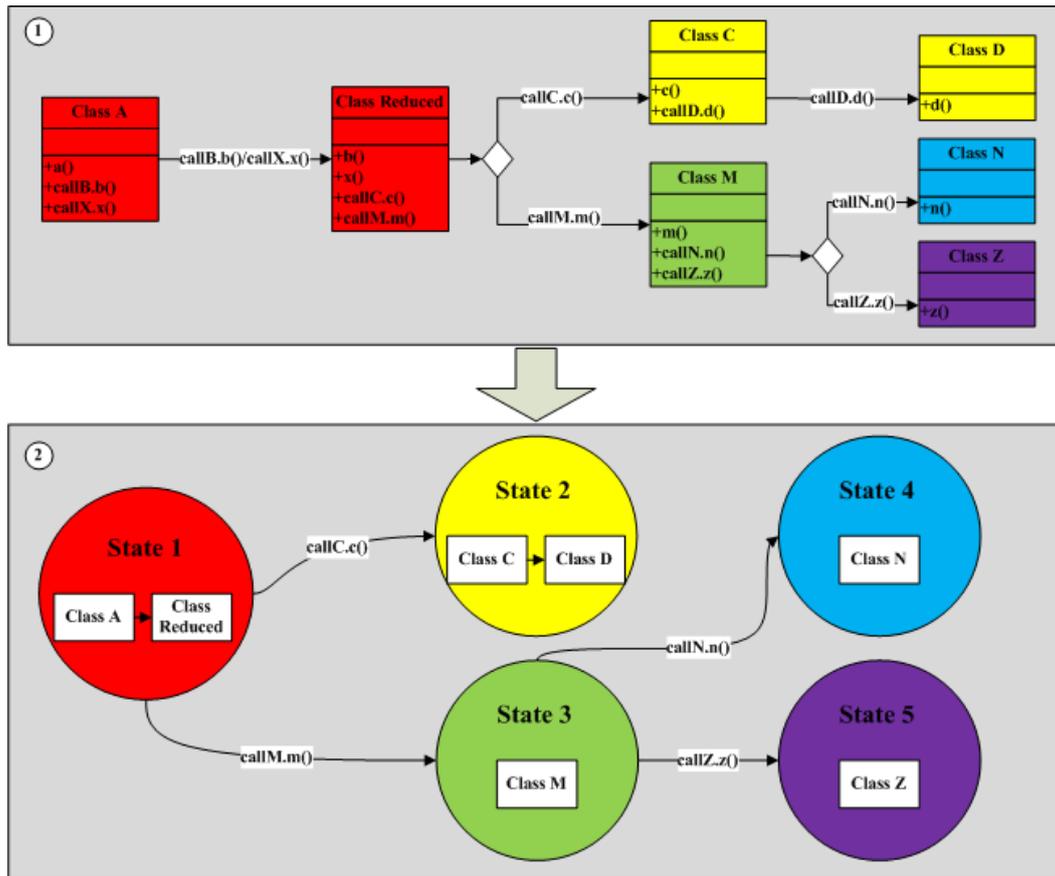


Figure 66. Principe de Génération d'un Modèle de Comportement

Il est possible de concevoir à partir de la Figure 66, qu'un graphe orienté de classe peut posséder de nombreuses branches. Chaque branche représentant une affirmation qui décide de la redirection d'un appel de fonction. Par conséquent, une boîte d'assertion pourrait être ajoutée à l'endroit où la branche apparaît. Si la boîte est considérée comme le point de coupure du graphe, les nœuds avant ou après la zone d'assertion appartiennent à un ensemble rendu indépendant. Par conséquent, cet ensemble indépendant peut être considéré comme un état distinct. Par exemple, dans la Figure 66, le système fonctionne correctement de la classe A vers la classe Réduite, jusqu'à ce qu'il rencontre la zone de d'assertion, puis il s'arrête pour décider de la prochaine direction. Dans ce cas, les actions de la classe A et de la classe réduite peuvent être traitées comme des actions internes avec un seul état. Pour effectuer cette combinaison sur chaque boîte d'assertion, le diagramme d'états peut être optimisé par le schéma d'états réduit exposé en bas de la Figure 66. Chaque état comporte alors des poignées (« handle ») de classes, de sorte que lorsque l'état est actif, le programme puisse écouter l'entrée représentant l'appel de fonction. L'appel de fonction entre les classes est une transition de ce diagramme d'états, car l'appel de fonction est interprété comme un événement envoyé puis déclencheur, par l'acceptation de la fonction, d'un changement d'un autre état.

A ce stade de l'étude, il est clair que cette méthode ne permet pas de spécifier un nombre exact d'états, cependant la conception d'un adaptateur ne nécessite pas de distinguer parfaitement tous les états du système. L'objectif de l'adaptateur sera de prendre une décision rapide concernant le flux de données basée sur des assertions logiques simplifiées. Si la demande est simple à traiter, il répondra immédiatement. Si la demande est trop complexe pour répondre directement, il peut invoquer le sous-système correspondant pour la réponse.

5.5.3 Génération des « Code Block » Fédérés

Après la génération du modèle de comportement, les chemins d'exécutions possibles du système pourront être résumés dans différents diagrammes d'états correspondants à un sous ensemble d'opérations (Cas 1.2.N Figure 67). Les diagrammes d'états possibles seront générés à partir des fonctions en testant les différentes relations logiques. Nous pensons que le bloc de code fédéré nécessitera une fonction de contrôle pour envoyer la requête à la bonne fonction d'analyse logique. La Figure 67 fait apparaître un état initial qui est ajouté pour jouer le rôle de contrôleur et diriger la demande, et un état final pour centraliser le résultat final.

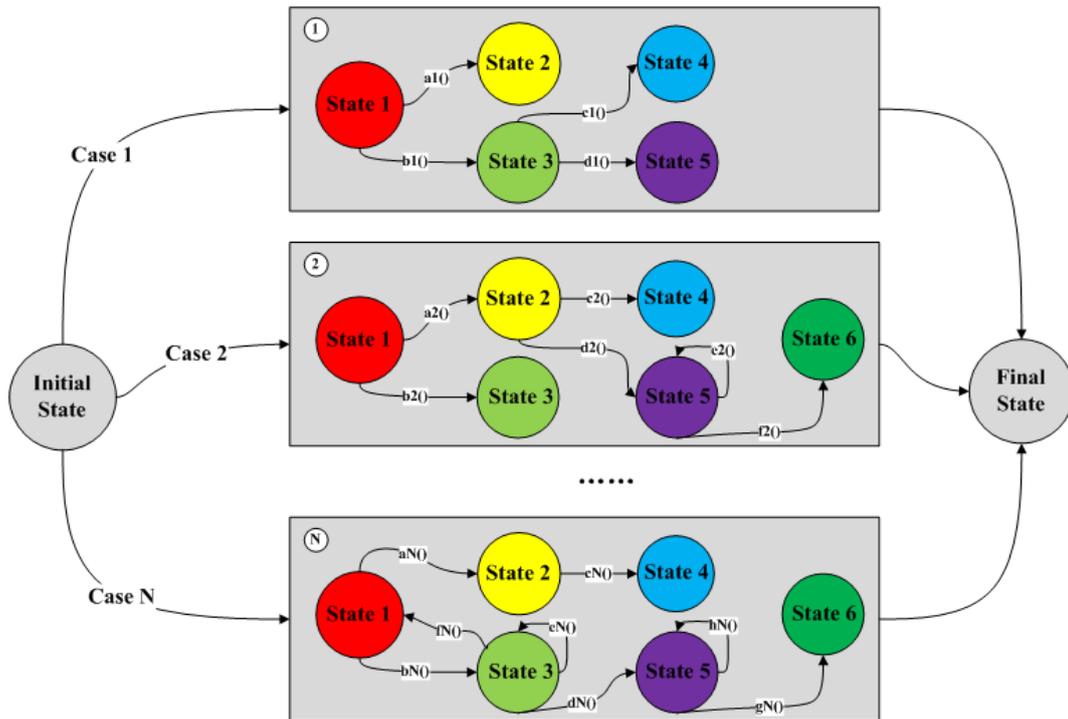


Figure 67. Génération de Fédérés “Code Block”

Nous décrivons ici la séquence de macros étapes d'un algorithme général :

- 1) **Génération de code de l'état initial** : Il classe les opérations en différentes catégories telles que les conditions logiques, les plages de données, les expressions régulières des opérations. Ensuite, le code de l'état initial contiendra la déclaration des structures alternatives (ex. *if*, *else*, *switch case*) sur la base des conditions de sélections logiques.
- 2) **Génération du code des diagrammes d'états de 1 à N** : Si l'accès aux données (ex. la base de données du SI existant) peut être ré invoquée, des tests pourront reconstruire des diagrammes d'états de processus simples puis simulé pour émuler sommairement le code original du système. Sinon, chaque action interne de ces diagrammes d'états devra être découverte par un appel de classe depuis un point d'entrée pour accéder aux classes internes du système. L'appel de fonction entre les classes sera aussi utilisé pour identifier les transitions d'état. La création de chaque état des diagrammes sera donc progressive.
- 3) **Génération de code spécifique pour le RTI** : Pour permettre l'interopérabilité de ce SI, le code fédéré pourra mettre en œuvre les fonctions de rappel *RTI::FederateAmbassador* de HLA, telles que la fonction d'octroi d'avance de temps, les fonctions d'envoi et de réception d'interaction, les fonctions pour refléter les valeurs de attributs, etc. Cette étape demandera de customiser l'adaptateur, de sorte à répondre aux demandes des participants

compatibles HLA. Ainsi, des objets et interactions seront définis et publiés pour permettre à d'autres fédérés d'y souscrire. Toutefois, spécifier et coder en dynamique les interactions dans le FOM HLA, comme souhaité dans une négociation « à la volée » de l'approche fédérée, reste pour le moment impossible. Enfin, un code sera ajouté dans l'état initial, pour distinguer les types d'interaction et définir des *Templates* de modèles.

- 4) **Génération de code de l'état final** : Enfin l'exécution finira par cet état final qui appellera la fonction d'envoi de l'interaction pour répondre aux demandeurs. L'état initial pourra aussi reboucler vers n'importe quel ensemble d'états (de 1 à N).

5.5.4 Conclusion

Dans l'ensemble, les étapes décrites ci-dessus devront permettre de guider et compléter un FOM HLA, et générer une fonction de contrôle, et plusieurs fonctions de simulation. La fonction de contrôle sera chargée d'acquiescer la demande du participant en distinguant les poignées d'interaction et en utilisant un modèle approprié en jugeant à partir des déclarations de condition. Ensuite la demande sera transmise du demandeur au code de simulation correspondant. La fonction de simulation traitera la demande en simulant le processus d'affaires du système existant. La continuité de la spécification puis l'opérationnalisation de ces travaux demandent un effort d'une durée estimée à 5 ans. Nous venons de démarrer avec Joseph Rahme Youssef [T6] une thèse, soit un horizon de 3 années pour pouvoir étayer la méthode de découverte des modèles et l'opérationnaliser dans un contexte HLA et services web.

5.6 Conclusion générale des Perspectives

L'ensemble de ces perspectives démontre la dynamique et le potentiel des domaines de recherche : Interopérabilité (transformation verticale et horizontale de modèles, sémantique) et Simulation ; tout cela pour la création du futur SI des entreprises. En particulier, les perspectives données à l'échelle nationale et internationale (FUTURPROD, 2013) (FINES, 2012) rappellent et convergent toutes sur le besoin non satisfait d'interopérabilité pour les systèmes dans leurs phases de conception et de réalisation. En l'occurrence, le besoin accru de réutilisation et d'automatisation des changements de modèle ou de paradigme. L'EI avec l'approche fédérée est également dans cette tendance avec un besoin d'adaptation par négociation dynamique.

Les travaux planifiés à court terme dans le cadre des thèses démarrant cette année s'inscrivent dans cette demande. La première thèse contribuera à l'utilisation des aspects sémantiques pour une interopérabilité horizontale dans la transformation des modèles métiers en modèles de simulation. La deuxième thèse contribuera à continuer à (re)découvrir des propriétés des systèmes existants pour faciliter les redéveloppements et leur intégration dans leurs nouveaux environnements.

Nous pouvons imaginer au-delà, dans un horizon plus éloigné, des scénarios allant jusqu'à l'interprétation et la construction de modèles de futur SI directement à partir d'énoncés en langage naturel. Ceci étant l'objectif ultime de l'approche fédérée pour l'interopérabilité d'entreprise. Nous nous efforcerons de continuer à nous inscrire dans ces perspectives. Nous portons déjà dans nos recherches prospectives des travaux émergents tels que l'étude et l'impact des réseaux sociaux dans la maîtrise de la propagation de messages et d'informations entre individus ou groupes doués d'un comportement et d'un positionnement. Nous gageons du fait que ce dernier maillon permettra de fermer la boucle d'interaction pour une simulation totale du système, de son environnement et de ses utilisateurs.

5.7 Coopérations

J'ai initié depuis plusieurs années des collaborations avec des chercheurs internationaux. Je donne ici un résumé des actions les plus concrètes et significatives. Enfin j'ai obtenu un CRCT au 2ème semestre 2015 qui me permettra d'effectuer des visites scientifiques pour initier ou développer ces collaborations.

Tout d'abord, j'ai eu en 2009 l'occasion de collaborer avec l'Université Laval. J'ai été retenu dans le cadre du Programme d'Echange d'Experts Scientifiques (PEES) sur le domaine de recherche "Multi Agent / HLA Enterprise Interoperability (*Short-Lived Ontology Based*)". J'ai pu avec cette bourse effectuer un séjour de Professeur invité à l'Université Laval, Québec d'un mois en Février 2009. Nous avons publié un chapitre d'ouvrage commun. J'ai récemment obtenu un financement IDEX pour recevoir le Pr. Gabriel Wainer de l'Université Carlton à Ottawa pour une période de Professeur invité à l'université de Bordeaux pour 1 mois en 2015.

5.7.1 Coopération avec L'Université « Old Dominion University »

Les sujets de recherche relatifs à l'interopérabilité des SI et des simulations, présentés dans la synthèse des travaux et dans les perspectives des sections précédentes, sont partagés avec d'autres groupes de recherche. En particulier le Dr Saikou Diallo, Directeur du groupe de recherche en interopérabilité de modélisation et simulation au laboratoire VMASC et le Dr Mamadou Seck tous deux basés à ODU à Norfolk, USA qui travaillent sur des problèmes connexes. Les thèmes communs sont axés sur l'interopérabilité dans la simulation des processus d'affaires. Des résultats de travaux ont récemment ont été publiés dans (Turnitsa, et al., 2010) pour ODU et [R9] [R10] pour IMS. La transformation de modèle (ODU : (Çetinkaya, et al., 2012) et IMS : [C4]), et enfin l'approche sémantique de simulation (ODU : (Diallo, et al., 2013) et IMS : [R4]) sont les points communs. Je côtoie régulièrement ces deux collègues lors de conférences de simulation et nous échangeons nos points de vue. Ainsi l'idée d'une collaboration pour travailler sur ces sujets est apparue évidente.

L'équipe d'ODU s'emploie à faciliter l'interopérabilité des simulations dans un cadre d'interopérabilité auquel ont collaboré Andreas Tolk et Saikou Diallo (C4ISR Architecture Working Group, 1998). Ce cadre est aujourd'hui largement reconnu dans le domaine de la simulation. Ces deux chercheurs travaillent sur la théorie de l'interopérabilité en ce qui concerne l'ingénierie de données basée sur un modèle et les services web pour les applications de M&S. Ils se sont concentrés sur la résolution des conflits dans les modèles de données hétérogènes. Ils ont produit des documents de référence pour l'interopérabilité des systèmes et simulation appliquée au domaine militaire et civil. Des travaux analogues ont été réalisés principalement en Europe pour décrire un cadre d'interopérabilité, en particulier au cours du Rex Interop (INTEROP-NOE, 2006) où les chercheurs Bordelais étaient des responsables et des collaborateurs actifs. Ce passé témoigne d'une prédisposition claire à collaborer ensemble. Les collègues du VMASC ont d'ailleurs situé l'approche « Interop NoE » par rapport à leur propre cadre d'interopérabilité des SI, il y a plus de 10 ans. Ce début de collaboration m'a permis de recevoir une lettre d'invitation pour une période de chercheur invité ainsi qu'un financement d'un mois et demi dans son laboratoire. Cette période de visite permettra d'étendre ma connaissance sur le terrain de l'interopérabilité des simulations. Mon établissement d'origine et le réseau européen sur l'interopérabilité (InteropV-Lab) gagneront également de cette collaboration.

Un travail commun effectif sera lancé par la discussion pour trouver un consensus pour rédiger une méthodologie commune et proposer une plateforme facilitant l'interopérabilité

des simulations issues des recherches respectives. Le développement des composants manquants de la plateforme pourra se faire dans un horizon de quelques années. Les principales composantes étant déjà développées par ODU (Diallo, et al., 2013) et par IMS avec les travaux de Zhiying Tu [T1]. Au VMASC à ODU, leurs derniers travaux sont axés sur l'approche service web dans la simulation. Le travail conjoint pourra réutiliser le RTI (PoRTico, 2012) qui a déjà été utilisé à l'IMS, étendu pour être utilisé avec les services web tels que WSDL, et SOAP proposés par ODU. Le deuxième objectif consiste à terminer le développement d'un outil BPMN DEVS. Les spécifications des deux côtés devront être fusionnées à la dernière version de BPMN. Enfin, Le dernier objectif est plus prospectif. L'objectif est de mettre au point notre collaboration sur le plan des apports sémantiques pour soutenir la simulation. Nous parions pouvoir proposer des perspectives prometteuses de futurs travaux communs sur l'approche de mappage d'ontologie. Ce point est considéré comme la collaboration à long terme. Les objectifs à atteindre sont en partie quantitatifs avec le développement d'outils logiciels et qualitatifs avec une méthodologie et la perspective d'utilisation de la sémantique pour l'interopérabilité en simulation.

5.7.2 *Coopérations avec le CMRE de l'OTAN*

Nous avons récemment signé un « *Memorandum of Understanding* » (MoU) nous permettant de collaborer avec le NATO STO CMRE (*Centre for Maritime Research and Experimentation*) basé à La Spezia, Italie. Ce centre développe des simulateurs à vocation de défense. Le CMRE a récemment initié une nouvelle thématique de recherche focalisée sur l'interopérabilité des simulations en utilisant notamment la norme HLA. Cette opportunité est née d'une collaboration avec le Pr. Agostino Bruzzone chercheur à l'Université de Gênes et au CMRE. Cette collaboration dans le domaine de la simulation distribuée a démarré pendant ma thèse en 2004 et s'est poursuivie dans le cadre de projets communs depuis une dizaine d'année. Je détaille ci-après le thème commun que nous souhaitons développer.

L'interopérabilité des simulations offre de grandes opportunités pour le raccordement de systèmes existants et de nouveaux éléments dans un environnement mixant réalité et monde synthétique. La collaboration avec le CMRE se concentre sur l'étude et la définition de fédérations de différents systèmes interopérables. Nous utilisons la dernière version du standard HLA (IEEE, 2010) pour combiner en simulation des composants virtuels et d'autres éléments constructifs réels. Cette activité pourra bénéficier de mes travaux recherches antérieurs [T0] tels que l'approche G-DEVS/HLA [R8] [R12] [R13] pour fédérer différents simulateurs et de nos travaux récents en interopérabilité d'entreprise [O2] [O3].

Par conséquent, il apparaît des plus intéressant de développer une solution capable de supporter la simulation en tant que service (*SaaS*) [R6] ainsi que de faire fonctionner tous les éléments comme des fédérés dans une fédération HLA. Tel est l'objectif de cette recherche conjointe au cours de la période de visite sollicitée. En toile de fond, nous proposons d'utiliser des algorithmes pour la simulation à événements discrets (en particulier ceux que j'ai pu développer pour G-DEVS) dans une Simulation Distribuée basée sur HLA (IEEE, 2000). Nous avons également proposé, dans [R2], [R3], des améliorations de la mise en œuvre de SI existants quand ils sont appelés à participer à un Système de Systèmes (SoS), c'est à dire une fédération de SI d'entreprises qui interagissent. Une autre idée vise à découvrir et réutiliser les expériences locales en provenance de l'élaboration initiale du SI existant grâce au processus de découverte de modèles et approche ontologique [R5]. En synthèse, nous souhaitons combiner les points forts de MDA et d'HLA pour soutenir la transformation de modèles conceptuels vers la mise en œuvre des systèmes distribués. Le résultat sera la mise en œuvre

d'un cadre HLA/MDA pour le développement des simulations de problèmes de M&S liés à la défense et la sécurité intérieure dans le contexte maritime de la CMRE OTAN.

Basé sur les expériences respectives, le premier objectif du travail commun consistera à mettre en place une plateforme pour l'orchestration des protections portuaires par la simulation hétérogène d'opérations navales et de composantes réels. Cette plateforme peut être inspirée de l'approche de flux de travail proposé dans [R12], avec un moteur d'orchestration et d'une interface de contrôle utilisé pour gérer l'échange d'informations entre les composants simulés et les autres. Les autres composants pourront être des services web, des interactions humaines, des capteurs ainsi que des interfaces de base de données, reliés entre eux pour fournir un *SaaS* global. Le scénario d'action pourra être décrit en BPMN puis transformé selon la méthodologie en modèles simulables (ex : G-DEVS) afin d'exécuter le comportement global. Un RTI HLA (par exemple le poRTico qui est open source) sera utilisé pour synchroniser l'ensemble des échanges de messages au sein de la plateforme. L'approche *SaaS* est particulièrement nécessaire depuis la dernière version de la norme HLA qui demande de définir les fédérés comme des agents de services. Cependant ce besoin reste un défi.

La connexion de composants de simulation et des données provenant de capteurs du monde réel ou d'interactions humaines, doit faire face à l'hétérogénéité des structures de données et de contenus. La signification des données pourrait faciliter l'interopérabilité par un mappage de l'information. Les expériences sur le mappage à base d'ontologie dans le cadre de la thèse de Fuqi Song [T2] [R4], [R5], présentées section 4.4, pourront répondre à l'interopérabilité sémantique. L'alignement par les matchers permettra de faciliter l'interopérabilité entre les différents SI hétérogènes de l'OTAN (mer, air, côte, cybermonde et espace). L'approche modélisation du comportement humain [C1] [C3] pourra contribuer à la pertinence du comportement au niveau local ou de l'entité globale. Ces concepts pourront aider les données hétérogènes et les *big data* à se réconcilier et s'organiser pour être utilisées plus efficacement en simulation. Ces domaines de collaboration sont également une perspective commune de coopération appelée à se poursuivre après le(s) séjour(s) de chercheur invité.

5.7.3 Visites dans le cadre du CRCT 2015

J'ai obtenu, en sélection nationale, un CRCT (congé pour une période de recherche à temps plein), qui est une subvention de 6 mois. Ce congé me permettra de me consacrer à la visite des collègues de ces deux collaborations. Je présente Figure 68 le planning de ce CRCT. Il contiendra donc la période de mobilité de 1,5 mois dans le laboratoire VMASC à l'Université Old Dominion (ODU), à Norfolk, USA et de 1,5 mois au CMRE à La Spezia, Italie. Dans ce contexte, cette période de visite dans ces deux laboratoires se situe entre une période amont dédiée à la préparation scientifique et bibliographique pour être rapidement opérationnel au cours des séjours. Le retour en France après les séjours permettra de faire le bilan du travail accompli à ODU et au CMRE avec des collègues notamment à l'IMS et de finaliser le premier document initié durant le séjour.

Nous espérons obtenir rapidement des résultats qui seront soumis dès que possible à publication en conférences et en revues internationales. Nous envisageons tout d'abord de produire un document conjoint sur l'interopérabilité en entreprise du point de vue simulation avec ODU. Ce rapport sera une synthèse et une convergence des deux méthodes. Nous préparons par ailleurs un article sur la transformation des modèles de BPMN vers DEVS validant les travaux menés conjointement ([C4], [C5] et (Çetinkaya, et al., 2012)) par l'intégration des modèles des deux parties sur un outil open source. Avec le CMRE, nous proposerons d'utiliser la SLMToolBox pour modéliser les processus opératoires et décliner les composants de simulation HLA. Nous pourrions en produire un rapport de positionnement.

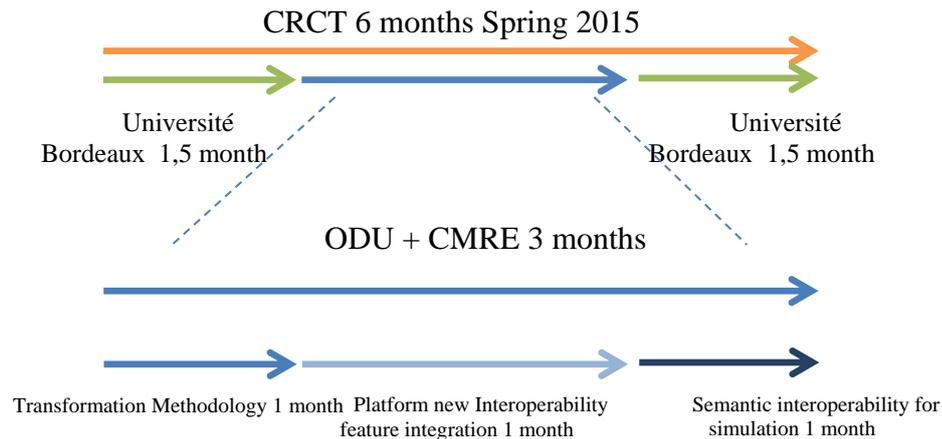


Figure 68. Programme de Collaboration dans le CRCT

Nous souhaitons par ailleurs préparer une activité de participation au groupe de réflexion à la norme HLA (norme maintenue par IEEE et le *Simulation Interoperability Standardization Organization* (SISO, 2000)) avec les collègues du CMRE et ODU. Enfin, concernant les travaux en cours sur les aspects sémantiques, nous allons procéder avec CMRE et ODU à un examen de l'appel à projet Horizon 2020 pour cibler un thème qui peut accueillir l'utilisation de l'ontologie dans la simulation. La période de visite permettra de pouvoir collaborer étroitement avec notamment Saikou Diallo (directeur de l'équipe de recherche interopérabilité modélisation et la simulation). Il travaille sur un cadre d'interopérabilité qui pourra être couplé à notre méthode de découverte et transformation de modèles présentée dans ce document. Mamadou Seck et moi-même travaillons sur les mêmes sujets de transformation de modèle depuis environ 10 ans. Le travail effectué des deux côtés avec Mamadou Seck sur la transformation BPMN vers DEVS de modèles sont des pièces complémentaires du puzzle. C'est l'occasion concrète de mettre la dernière pierre à ce travail que nous menons en parallèle. Des travaux récents (Çetinkaya, et al., 2012) et [C2] attestent que nous sommes proches de cet objectif.

Enfin la visite au laboratoire CMRE me permettra de collaborer avec le Pr. Agostino Bruzzone qui est reconnu comme l'un des spécialistes de la simulation distribuée et HLA. Particulièrement, il coordonne annuellement le concours de simulation organisé par la NASA (NASA, 2014). Je participe également à cet événement et j'ai pu co-écrire une publication en conférence invitée en collaboration avec des chercheurs NASA [I1].

5.7.4 Conclusion des Coopérations

En conclusion, ces coopérations sont à différents stades de maturité. J'ai la conviction que les périodes de visite au VMASC à ODU et au CMRE seront très productives du fait des travaux en cours respectifs et de l'implication des partenaires dans les discussions préalables depuis le début de ces collaborations.

De façon générale ces périodes de Chercheur Invité me permettront d'approfondir mes connaissances scientifiques dans les domaines visés, mais également au sens général, mes connaissances culturelles du monde scientifique dans ces deux organismes. Enfin j'espère pouvoir développer une collaboration durable avec des interactions fréquentes entre la France et les Etats-Unis, et la France et l'Italie

6 Synthèse d'Activités

6.1 Synthèse d'Activités d'Enseignement

Tableau 12. Synthèse des enseignements

| Thèmes | Parcours IUT / Licence Pro 2007/2014 | Master Productique 2009/2014 | Ecoles d'ingénieurs |
|---|--|--|--|
| Modélisation & Simulation | IUT MP : modélisation DEVS, Logique Booléenne, séquentielle 20 HTD + 20 HTP | M. International : Simulation distribuée 6 HCM | |
| Mathématiques | IUT MP : Proba, Stat 18 HTD | | |
| Informatique | IUT MP : C++, Réseaux, Informatique d'instrumentation, Macros 10 HTD + 31 HTP | SPIA : Mise à niveau informatique (Java) et réseau 9 HTD Projet : 35 HTD | CNAM Aquitaine (2009-11-13) : Réseaux de terrain, bus d'information, SE parallèles, temps réels 12 HCM + 5 HTP |
| Gestion de Projet + Suivi de Stage | Licence Pro 2MCI : Gestion de projet logiciel 4 HTD + 4 HTP IUT MP : Projet Pers. Prof: 10 HTD Projet Sc Tut. : 20 HTD | SPIA : Projet Java, cryptographie + sockets Projet : 10 HTD | |
| Workflow, BPMN & ERP | | IPPSI / SPIA : Workflow, BPMN, ERP 4 HCM + 6 HTD + 6 HTP | EMSI (depuis 2011) : Workflow, BPMN, ERP 10 HCM+ 10 HTD EIGSI (depuis 2012) : BPMN 6 HCM + 6 HTP ESTIA (2015) : ERP 5 HCM+ 5 HTD Polytech'Marseille (2003-2007) Workflow, DEVS Projet : 30 HTD |
| Techniques d'Analyses Numériques | IUT MP : Résolution des équations non linéaires, interpolation, dérivation et intégration 16 HTD + 24 HTP | SPIA : Application de techniques mathématiques à la cryptographie 3 HTP | |
| Ecritures et multimédia | IUT MP : Bureautique 28 HTP IUT SRC : XML, XSLT, XHTML 20 HTD (Arrêté en 2011) | | |

HTP: Heure de TP, HTD : Heure de TD, HCM : Heure de cours Magistral.

L'IUT MP ne propose pas de CM. Nous détaillons ci-après ces enseignements.

6.1.1 Mesures Physiques

Mon activité d'enseignement est affectée à l'IUT de Bordeaux dans le département Mesures Physiques. Mes enseignements sont relatifs à l'informatique, les réseaux informatiques, les mathématiques, une introduction à la modélisation et simulation et les techniques d'analyses numériques. Je suis depuis 2007 webmaster du site web de l'IUT et gère notre présence sur les réseaux sociaux, ce qui m'a demandé de développer une compétence en édition de contenus web (Joomla). Je suis membre élu au conseil de département de Mesures Physique depuis Avril 2013.

Je participe au projet d'accompagnement des étudiants dans leurs recherches de poursuite d'études ou de secteurs d'activités dans le cadre du Projet Personnel et Professionnel (PPP). Je coordonne des actions et des enseignements en Informatique au département MP et je suis également responsable du module informatique de S1 en MP depuis 2009.

6.1.1.1 Informatique (Algorithmique, Programmation, C++, Java, Python)

J'enseigne ce module depuis 2007. Cet enseignement est effectué depuis 4 ans en anglais dans le cadre du parcours européen. Ce cours s'adresse aux étudiants de premier semestre de DUT MP. Je l'ai également utilisé avec certaines adaptations pour une remise à niveau en Master 1 Productique. Il démarre par la présentation générale de l'histoire informatique, matérielle et logicielle. Il présente ensuite les caractéristiques d'un algorithme. Nous insistons notamment sur les notions suivantes : structures d'un programme, séquences, alternatives, variables, instructions d'entrée/sortie, conditions sur les variables, compteurs, itérations, procédures, sélections, manipulations de tableaux et de chaînes de caractères. En synthèse, cet enseignement a la prétention de permettre aux étudiants d'appréhender la logique séquentielle d'écriture d'un algorithme indépendamment d'un langage de programmation particulier.

La partie pratique se focalise sur le langage C++. J'enseigne la partie Cours/TD en anglais. En particulier la première partie du cours présente un rappel historique de l'informatique moderne avec les mots clefs anglais importants. Pour la partie TP j'ai fait appel à Fuqi Song et Zhiying Tu tous deux anglophones pour assurer un encadrement des étudiants en anglais depuis 2010.

6.1.1.2 Techniques d'Analyse Numérique

J'ai élaboré ce cours pour proposer un nouveau module optionnel de semestre 4 en MP en 2009. Il m'est apparu important de pouvoir donner des bases pour comprendre les techniques manipulées souvent de façon opaque par les étudiants en MP afin d'avoir un peu plus de recul lors de leurs mises en œuvres.

Ce cours démarre par une introduction aux techniques d'analyses numériques. Il comporte des techniques de résolution des équations non linéaires (recherche de 0), des techniques d'interpolation numérique, de dérivation et d'intégration numérique.

En phase pratique, l'utilisation d'un outil de développement logiciel permet de coder en C++ les principales techniques vues en théorie. Des exercices permettent de mettre en œuvre directement les concepts et méthodes présentées, de faciliter les calculs et valider l'approche.

6.1.1.3 Réseaux Informatiques et Chaines d'Acquisition d'Information

Dans ce module je propose un enseignement qui permet de vulgariser les notions de réseau local et global. Ceci permettant aux étudiants d'avoir des notions pour les manipulations de mesures en réseau.

Je présente en détail le protocole TCP/IP, l'adressage IP (IPV4 et 6) avec la configuration d'un réseau local, les masques, la taille du réseau, les notions de routage de l'information, les paquets, les passerelles, les tables de routages. La mise en pratique se fait par l'utilisation d'un live CD Linux qui permet de découvrir les commandes réseau de ce système d'exploitation et la comparaison avec les autres systèmes.

6.1.1.4 Probabilité et Statistiques

Ce cours participe à un module organisé par Mme Caroline Del Borello, enseignante en Mathématique, au département, j'y participe depuis 2007. Ce cours aborde la notion de probabilité, variable aléatoire, densité de probabilité, fonction de répartition, paramètres, loi uniforme, loi triangulaire et loi de gauss. Ce cours s'adresse aux étudiants de première année.

En deuxième année nous continuons la partie probabilité avec les variables aléatoires fonctions d'une ou plusieurs variables aléatoires et enfin les relations de corrélation.

Nous effectuons ensuite un rappel de métrologie. Ceci afin de démarrer le cours de statistiques qui contient les estimateurs, l'ajustement linéaire, les intervalles de confiance, l'hypothèse sur l'espérance, et la comparaison de deux populations.

6.1.1.5 Bureautique

Ce cours permet d'enseigner les bases du traitement de texte et du tableur afin de pouvoir les utiliser en TP. Concernant le tableur, la génération de graphiques, les régressions et les calculs automatisés sont présentés.

6.1.1.6 Gestion de la relation IUT MP – Industrie

J'ai eu la responsabilité de gérer le contact avec la société National Instrument. Nous avons accueilli dans nos locaux des industriels pour des sessions de formation au logiciel LabView. Ces sessions ont permis de nouer des liens avec ces industriels en leur faisant découvrir le département MP et en particulier l'option permettant à nos étudiants d'aborder le logiciel LabView. J'assure depuis 2011 par ailleurs l'organisation de la visite d'entreprises.

6.1.1.7 Modélisation et Simulation

J'ai proposé un cours sur les modèles de Mealy et de Moore. Ce cours se focalise notamment sur les modèles DEVS (présent dans le chapitre 4 de recherche) qui permettent de modéliser les retards par durée de vie des états. Le TP associé permet d'utiliser les derniers résultats de nos recherches, ici la plateforme SLMToolBox pour les modèles DEVS.

J'enseigne également la logique combinatoire et séquentielle. En pratique nous utilisons le langage VHDL, et des mémoires électroniques pour charger nos programmes.

6.1.1.8 Gestion de projet informatique

J'enseigne en licence Pro 2MCI la Gestion de Projet Informatique. L'objectif est de permettre aux étudiants de s'approprier des méthodes pour aborder leur projet de spécialité. Je présente les différents cycles de développement existants en informatique, des plus simples au plus sophistiqués : en cascade, en V, spirale, itératifs, incrémental.

La deuxième partie de cet enseignement consiste à accompagner des étudiants dans un projet de réalisation d'un robot à l'aide des briques lego Mindstorm. Ce projet managé par Jérôme Cieslak se termine par une mise en compétition locale des équipes puis au niveau de l'université.

6.1.2 Enseignements en Master et Ecoles d'ingénieurs

6.1.2.1 Master de Production (SPIA, IPPSI et International) à l'U. de Bordeaux

J'ai créé un cours sur la modélisation de processus. Ce cours démarre par un rappel de l'historique des Workflows, il présente ensuite le langage BPMN. Enfin, je présente les ERP et fais le lien avec les modèles de processus définis précédemment. Je donne également un cours sur les réseaux, l'algorithmique, la programmation JAVA et la simulation distribuée

J'ai conçu en synthèse un projet d'application. Ce projet fait intervenir des notions de réseaux TCP/IP et de cryptographie. Il permet de faire le lien entre l'ensemble des notions rencontrées dans la mise en œuvre d'un réseau local avec un modem routeur. Ceci afin de mettre en œuvre les notions de réseau et de programmation à base de *sockets*.

6.1.2.2 IUT SRC Université de Bordeaux 3

J'ai eu l'occasion pendant trois années d'enseigner à l'IUT SRC les formats d'écriture numérique. J'ai pu présenter le format XML, son utilisation, la validation des codes XML. Leur mise en forme par XHTML. Leur transformation par XSLT.

6.1.2.3 Ecoles d'ingénieur

6.1.2.3.1 École d'ingénieurs en génie des systèmes industriels (EIGSI) La Rochelle

J'enseigne à l'EIGSI depuis un an le formalisme BPMN. Dans le cadre d'une filière du parcours international, je présente les concepts BPMN puis un cas d'étude de modélisation dans ce format d'un cahier des charges informel.

6.1.2.3.2 Ecole Marocaine des Sciences de l'Ingénieur (EMSI) Rabat

Dans le cadre du Master Productique délocalisé à Rabat, j'enseigne à l'EMSI les Workflow, BPMN et les ERP. Je présente un cas d'utilisation d'un ERP comme cas d'étude détaillé avec la mise en place d'un jeu de rôle.

6.1.2.3.3 CNAM d'Aquitaine

J'ai enseigné dans le module Automatique du CNAM depuis 4 ans, les réseaux industriels, les bus d'informations et les systèmes d'exploitation et de commande temps réels et parallèles.

6.1.2.3.4 Polytech'Marseille

J'ai eu l'occasion dans le cadre d'un contrat d'ATER en 2006-2007 d'enseigner dans la filière informatique et sciences de la production de Polytech'Marseille la gestion des Workflows.

J'ai notamment pu encadrer des étudiants dans le cadre d'un suivi d'une démarche qualité visant à rédiger les procédures qualité et évaluer le logiciel de Workflow Tibco pour la préparation d'une certification.

6.2 Synthèse d'Activités et Résultats de Recherche

6.2.1 Activités Significatives dans le Contexte National et International

Depuis 2006, J'ai participé à la publication de 13 articles dans des revues internationales indexées, dont 12 avec des IF, plus de 40 articles en conférences internationales, et 3 chapitres de livres publiés³. J'ai obtenu en 2011 une "Prime d'Excellence Scientifique" de 4 ans.

Sur le plan de l'implication dans la communauté, j'ai été « **Progam Chair** » '12,'13 puis « **General Chair** » '14 de **TMS/DEVS**. J'ai été « **Tutorial Chair** » '14 et je suis « **Publicity Chair** » de Springsim'15. J'ai été sollicité pour **Program Chair** de Springsim'16.

Reconnaisances : Best Paper : I3M09, IESA10, Sélection Journal : KES12, I3M 13.

6.2.2 Encadrement de Post Doc

[P1] Encadrement 100% **Judicael Ribault** (Jan 2012 – Dec 2012) Titre: *Plateforme de Simulation & d'Interopérabilité des Données Distribuées*, 1 revue, 3 conf.

6.2.3 Co-Encadrements de Thèses

[T1] Co-Encadrement 50% Thèse: **Zhiying Tu** (Sept 2009 – Dec 2012) Titre: *Federated Approach for Enterprise Interoperability: A Reversible Model driven and HLA based methodology*, 2 revues, 1 book chap, 3 conf.

[T2] Co- Encadrement 50% Thèse: **Fuqi Song** (Sept 2010 – Nov 2013) Titre: *Contribution of Ontology Alignment to Enterprise Interoperability*, 2 revues, 1 book chap, 3 conf.

[T3] Co- Encadrement 50% Thèse: **Hassan Bazoun** (Mars 2012) Titre: *Methodology of Model Transformation Using MDA/MDI*, 1 revue soumise, 3 conf.

[T4] Co- Encadrement 50% Thèse: **Youssef Bouanan** (Nov 2013) Titre: *Formal Modeling and Simulation of Data Influence on Individuals in Social Network System*, 3 conf.

[T5] Co- Encadrement 50% Thèse: **Wang Yan** (Septembre 2014) Titre : *Approche sémantique dynamique pour soutenir l'interopérabilité du système d'information*

[T6] Co- Encadrement 50% Thèse: **Joseph Rahme Youssef** (Octobre 2014) Titre : *Model based distributed simulation of production schedules in the multi-sites networking enterprise environment*

6.2.4 Encadrements de Stages de Master Recherche

[M1] Encadrement 100% **Zhenchuan Zhang** (Mars-Juillet 2010) Titre: *Distributed enterprise information system interoperability based on HLA Evolved SOA*, 1 conf

[M2] Encadrement 100% **Rabih Kazma** (Mars-Juillet 2012) Titre: *BPMN-DEVS Transformation for M&S*

[M3] Encadrement 100% **Wei Du** (Mars-Juillet 2012) Title: *Behavior Model Discovery to Support Reverse Engineering of Object-Oriented Software*

[M4] Encadrement 100% **Youssef Bouanan** (Mars-Juillet 2013) Titre: *BPMN to DEVS Model Transformation for Simulation*, 1 conf

[M5] Encadrement 100 % **Liu Zhe** (Mars-Juillet 2014) Titre : *Model transformation from BPMN format to openERP Workflow*, 1 conf

[M6] Encadrement 100 % **Merouane El Alaoui** (Mars-Juillet 2014) Titre : *Modélisation et Simulation des Réactions de populations à la propagation d'information*

³ <http://hal.archives-ouvertes.fr/aut/zacharewicz/>, elles sont également données dans en 7.1

6.2.5 *Participation et Leadership de Projets*

6.2.5.1 *FUI SIMID (Responsable Scientifique pour IMS)*

J'ai été Responsable Scientifique IMS du Projet FUI « Système d'Information de Maintenance Intégré et Distribué » (SIMID) de 2010 à 2014 (www.simid-project.eu).

SIMID a eu pour but de concevoir et développer un système sécurisé, évolutif et fortement « scalable (extensible) » permettant de mettre à disposition via Internet des services à forte valeur à destination des acteurs de la maintenance aéronautique. Les partenaires principaux étaient AIRBUS (Leader), DASSAULT, EUROCOPTER, LaBRI, IMS.

Le **financement FUI pour IMS de 126 486 €** a permis notamment le financement d'un Doctorant (Fuqi Song). Nous avons produit 2 articles en journal [R4] [R5], des articles de conférence et un chapitre d'ouvrage.

6.2.5.2 *PSID2 Post Doc et Matériel Bourse Région Aquitaine*

J'ai été Responsable Scientifique IMS du projet PSID2 (2012) qui a permis un encadrement d'un Post Doc (Judicael Ribault) sur le Sujet « *Plateforme de Simulation & d'Interopérabilité des Données Distribuées* » adossé aux projets SIMID et PRODIGE.

Le **financement Région pour IMS de 52 000 €** a permis de financer un Post Doctorant et du matériel informatique. Nous avons produit un papier en conférence [C6] qui a été sélectionné pour un journal. Il a été accepté en journal [R1].

6.2.5.3 *Projet RAPID DGA SICOMORES (Responsable Scientifique pour IMS)*

Je suis responsable scientifique IMS du projet DGA RAPID SICOMORES (2013-2016) « Simulation constructive et modélisation des effets des opérations d'influence dans les médias sociaux ». Le **financement pour IMS est de 213 000€**, il comprend un doctorant et un PostDoctorant. Les partenaires sont le LSIS (labo de l'AMU), et l'entreprise MASA.

6.2.5.4 *Coordinateur Académique pour le Projet SEE (former Smackdown)*

Je suis un coordinateur universitaire du projet de simulation distribuée basée sur la norme HLA. Le coordinateur principal est la NASA. J'ai publié 1 papier co-écrit avec des chercheurs NASA [I1] (WinterSim 2011). (<http://exploresimulation.com>)

6.2.6 *Autres participations à des projets*

J'ai participé aux projets suivants. Je donne ci-après les activités que j'ai effectuées.

ISTA3 (FUI) : Audit du client avec modélisation EA* du SI existant et proposition d'un nouveau SI interopérables dans le domaine aéronautique en utilisant une approche MDA.

PRODIGE (ANR) : Travaux dans le cadre du Post Doc de Judicaël Ribault. Proposition d'une plateforme de test du SI par simulation et appel de services.

MSEE (FP7) : Travaux dans le cadre de la thèse d'Hassan Bazoun sur la transformation de modèles MDSEA et la proposition de la plateforme SLMToolBox.

FITMAN (FP7) : Audit du client avec modélisation BPMN du SI existant et proposition d'un nouveau SI interopérables dans le domaine du bois en utilisant une approche MDA.

SIZING (SUDOE) : Travaux autour du transfert technologique des données et traitement des mensurations dans le domaine du textile avec une approche orientée service.

6.2.7 Mobilités et Echanges Universitaires

6.2.7.1 Chercheur Invité Programme d'Echange d'Experts Scientifiques (PEES)

J'ai été retenu dans le cadre du Programme d'Echange d'Experts Scientifiques (PEES), pour une période chercheur invité sur le thème: "Multi Agent/HLA Enterprise Interoperability (Short-Lived Ontology Based)" (Université Laval, Québec Février 2009), 2 conférences publiques ont été données, 1 chapitre d'ouvrage a été publié.

<https://www.cirrelt.ca/Cirrelt/Images/File/GregoryZacharewicz18fevrier2009.pdf>

6.2.7.2 Invité ODU

Je suis invité au laboratoire VMASC de ODU en Avril-Mai 2015. Je suis financé par le laboratoire d'accueil (voir section 5.7.1). <http://www.vmasc.odu.edu/>

6.2.7.3 Candidature CMRE

J'ai effectué une demande de professeur invité au CMRE de La Spezia pour le période Juin-Juillet 2015 (Voir section 5.7.2). <http://cmre.nato.int/>

6.2.7.4 Invitation IDEX Université de Bordeaux

J'ai obtenu l'invitation du Pr. Gabriel Wainer au titre de l'Initiative D'EXcellence (IDEX) de l'Université de Bordeaux pour l'année Universitaire 2014-2015.

6.2.8 Membres de Comités Internationaux

General Chair de la Conférence ACM IEEE TMS / DEVS 2014, www.tms-devs.org, **Program Chair** de TMS/DEVS 12 et 13, je m'investis dans la société SCS en général.

Membre du Comité ANVUR (*Agenzia Nazionale di Valutazione del Sistema Universitario e della Ricerca*) **pour l'évaluation scientifique de projets nationaux et d'unités de recherche** en Italie (Evaluations réalisées: 7 projets, 9 travaux depuis 2010)

Membre de l'Ecole Doctorale "*Dottorato di Ricerca in Ingegneria delle macchine e dei sistemi per l'energia, l'ambiente e i trasporti*" **de l'Université de Gênes.**

Relecteur Revues Scientifique: Ex. Simulation, ISI, JVLC, SIMPAT, EJIE, IJBPSCM.

Membre du Comité scientifique de Conférences: SIMUTOOLS, SIMULTECH, I-ESA, INCOM'12, ECMS, WSC, I3M'10'11, APMS'09, DEVS'09,'11,'12, PADS'13,'14,'15.

Organisateur de Sessions Spéciales: APMS'09,'14, I3M'09,'10 MOSIM'10, WSC'11

Tutorial Chair of Springsim14, Publicity Chair of Springsim15, Program Chair SpringSim16 <http://scs.org/springsim>

Membre du Comité de Sélection pour un poste MCF à l'Université Aix-Marseille 2013

Editeur des ouvrages : TMS/DEVS'13,'12 MAS'10, SESDE'14, MAS'14.

6.2.9 Participation Jurys de Thèses

Rapporteur de thèse :

Jury de « Phd Thesis » de Shafagh Jafer: Sept. 2011, Carlton University, Ottawa, Canada, Titre: "*Parallel Simulation Techniques for Large-Scale Discrete-Event Models*"

Membre jury de Thèse :

Laura Capelli, Université de Gênes, Italy, 2011 Topic « *I Modelli Di Realtà Virtuale Nella Conservazione Delle Fonti E Delle Tradizioni Orali* »

Simonluca Poggi, Université de Gênes, Italy, 2011 « *Modelli per la Valutazione delle Performance nella Grande Distribuzione* »

6.2.10 Partenariats dans la communauté scientifique

Université Laval (Québec) (thème commun: systèmes multi-agent), Aix Marseille Université (Workflow, HLA, DEVS modélisation), Université de Gênes (HLA simulation distribuée), Université La Sapienza (ontologie, simulation distribuée), ODU (interopérabilité, transformation de modèles, Sémantiques pour l'Interopérabilité).

6.2.10.1 Animateur du Thème Ingénierie des Organisations Distribuées (IODE)

IODE propose de réduire la fragmentation de la recherche régionale en Génie Industriel en généralisant et développant ces collaborations. Le thème fédère plusieurs équipes de recherche des régions Aquitaine et Midi-Pyrénées sur les problématiques d'ingénierie des systèmes de production de biens et services, avec des sensibilités et des approches différentes.

<http://idce.enit.fr/iode/>

6.2.10.2 Organisation locale à Bordeaux de la conférence I3M 2014

J'ai organisé localement la 11^{ème} « *International Multidisciplinary Modeling & Simulation Multiconference* » (I3M'14) qui connaît la fréquentation d'experts en M&S. Cette conférence s'est déroulée du 10-12 septembre 2014 avec la participation de 160 chercheurs. Mon travail a consisté à obtenir des sponsors, trouver et assurer la location des locaux pour la conférence et pour le gala. J'ai également assuré la gestion logistique et promotionnelle de l'événement.

<http://www.msc-les.org/conf/i3m2014/>

6.2.10.3 Coordinateur Francophone du projet Dictionnaire de M&S Net et SCS

Sous l'impulsion du Pr. Tuncer Oren (“*IBM Top 3 Pioneers of Computing in Canada*”), 100 scientifiques travaillant dans huit pays (Canada, Chine, France, Italie, Norvège, Espagne, Suisse, Turquie et USA) sont impliqués dans le projet de Dictionnaire multilingue des termes du domaine Modélisation & Simulation. J'assure la coordination française.

http://www.site.uottawa.ca/~oren/SCS_MSNet/simDic.htm

6.2.10.4 Webmaster des Web sites (extrait)

- DEVS 12,13: <http://www.tms-devs.org>
- MOSIM 12 <http://www.lsis.org/mosim2012/>
- Département MP IUT Bx: <http://www.iut.u-bordeaux1.fr/mp/> (Co-Webmaster)
- APMS Conférence: <http://www.ims-bordeaux.eu/apms2009/>
- Pole INTEROP Grand Sud-Ouest (PGSO) <http://www.interop-gso.net/>

Contributeur de Contenu Régulier dans Wikipedia: Interop V-Lab, HLA, DEVS ...

J'ai également participé au comité d'organisation des conférences : CIESIE 2009, APMS 2009, Ecole d'été de Modélisation d'Enterprise 2009, 2012

7 Publications

7.1 Articles

- [R1] **Time-based orchestration of Workflow, interoperability with G-DEVS/HLA**
Judicaël Ribault, Gregory Zacharewicz
In : **Journal of Computational Science, Online first, doi: 10.1016/j.jocs.2014.07.002 (2014)**
(Impact Factor Thomson Reuters 2014: 1.567, Scopus SNIP 2014: 2.006)
- [R2] **A Federated Approach to develop Enterprise Interoperability**
Zhiying Tu, Gregory Zacharewicz, David Chen
In : **Journal of Intelligent Manufacturing, Online first, doi: 10.1007/s10845-013-0868-1 (2014)**
(Impact Factor Thomson Reuters 2012: 1.278, Scopus SNIP 2012: 2.013)
- [R3] **Building an HLA Federated Interoperable Framework from Legacy Information Systems**
Zhiying Tu, Gregory Zacharewicz, David Chen
in : **International Journal of Computer Integrated Manufacturing, 27(4): 313-332 (2014)**
(Impact Factor Thomson Reuters 2011: 0.553, Scopus SNIP 2012: 1.215)
- [R4] **Pattern-Based Core Word Recognition to Support Ontology Matching**
Fuqi Song; Gregory Zacharewicz; David Chen
In : **int'l Journal of Knowledge-Based and Intelligent Engineering Systems, 17(2): 167-176 (2013)**
(Impact Factor Thomson Reuters: ---, Scopus SNIP: 0.175)
- [R5] **An Ontology-Driven Framework towards Building Enterprise Semantic Information Layer**
Fuqi Song, Gregory Zacharewicz, David Chen
in : **Advanced Engineering Informatics, 27(1): 38-50 (2013)**
(Impact Factor Thomson Reuters 2010: 1.4, Scopus SNIP 2010: 2.381)
- [R6] **Product-service systems scenarios simulation based on G-DEVS/HLA: Generalized discrete event specification/high level architecture**
Thècle Alix, Gregory Zacharewicz
In : **Computers in Industry Elsevier, 63(4): 370–378 (2012)**
(Impact Factor Thomson Reuters 2011: 1.620, Scopus SNIP 2011: 4.011)
- [R7] **Distributed simulation platform to design advanced RFID based freight transportation systems.**
Gregory Zacharewicz, Jean-Christophe Deschamps, Julien François
In : **Computers in Industry, Elsevier, 62(6): 597-612 (2011)**
(Impact Factor Thomson Reuters 2011: 1.620, Scopus SNIP 2011: 4.011)
- [R8] **A Generalized Discrete Event System (G-DEVS) Flattened Simulation Structure: Application to High-Level Architecture (HLA) Compliant Simulation of Workflow**
Zacharewicz, G., Hamri, A., Frydman, C.; Giambiasi, N.
In : **Simulation, Sage, 86(3): 181-197 (2010)**
(Impact Factor Thomson Reuters 2010: 0.611, Scopus SNIP 2010: 1.358)
- [R9] **A model-driven approach to multidisciplinary collaborative simulation for virtual product development**
Zhang H., Wang H., Chen D., Zacharewicz G.
In : **Advanced Engineering Informatics, Elsevier, 24(2):167-179 (2010)**
(Impact Factor Thomson Reuters 2010: 1.4, Scopus SNIP 2010: 2.381)
- [R10] **Interopérabilité des entreprises. Vers l'utilisation d'ontologies éphémères**
Zacharewicz G., Vallespir B., Chen D.
In : **Ingénierie des SI. Hermès, 15(5):11-36 (2010)**
(Impact Factor Thomson Reuters --, Scopus SNIP --)
- [R11] **Environnement G-DEVS/HLA pour la simulation distribuée de systèmes de production multiprocessus**
Zacharewicz G., Pujo P., Frydman C., Giambiasi N.
In : **Journal of Decision Systems, Hermès, 18(3):375-402 (2009)**
(Impact Factor Thomson Reuters --, Scopus SNIP 2010: 0.177)
- [R12] **G-DEVS / HLA Environment for Distributed Simulations of Workflows**
Zacharewicz G., Frydman C., Giambiasi N.
In : **Simulation, Sage, 84(5):197-213 (2008)**
(Impact Factor Thomson Reuters 2008: 0.783, Scopus SNIP 2010: 1.358)
- [R13] **Lookahead Computation in G-DEVS/HLA Environment**
Zacharewicz G., Frydman C., Giambiasi N.
In : **Simulation News Europe, 16(2):15-24 (2006)**
(Impact Factor Thomson Reuters 2008: ---, Scopus SNIP 2008: --)

7.2 Thèse

- [T0] **Un Environnement G-DEVS/HLA : Application à la Modélisation et Simulation Distribuée de Workflow**
Gregory Zacharewicz, Aix Marseille Université, Novembre 2006

7.3 Chapitres d'ouvrage

- [O1] **Multi-strategies Ontology Alignment Aggregated by AHP**
Fuqi Song; Gregory Zacharewicz; David Chen
In *Advances in Knowledge-Based and Intelligent Information and Engineering Systems*, 243, pp. 1583-1592, **Frontiers in Artificial Intelligence and Applications (FAIA)**
(Impact Factor Scopus SNIP 2012: 0.175), doi : 10.3233/978-1-61499-105-2-1583
- [O2] **A Multi Agent/HLA Platform for Enterprises Interoperability: Short-Lived Ontology Based**
Gregory Zacharewicz, Olivier Labarthe, David Chen and Bruno Vallespir
In **Electronic Supply Network Coordination in Intelligent and Dynamic Environments: Modeling and Implementation**, ed. Mahdavi, Mohebbi and Cho, 319-346 (2011). doi:10.4018/978-1-60566-808-6.ch014
- [O3] **HLA Supported, Federation Oriented Enterprise Interoperability**
Gregory Zacharewicz, David Chen and Bruno Vallespir
In **Electronic Business Interoperability: Concepts, Opportunities and Challenges**, ed. Ejub Kajan, 539-569 (2011), doi:10.4018/978-1-60960-485-1.ch022

7.4 Conférences Invitées

- [I1] **SMACKDOWN: Adventures in Simulation Standards and Interoperability**
Priscilla Elfrey; Gregory Zacharewicz; Marcus Nie
In: Winter Simulation Conference WSC (2011), Dec 2011, Phoenix, United States. Proceedings of the 2011 Winter Simulation Conference WSC (2011)
- [I2] **Distributed Environment for "Greener" Transportation of Smart Product**
Gregory Zacharewicz; Jean-Christophe Deschamps; Julien Francois
In: XV Summer School "Francesco Turco", Sep 2010, Italy, pp. 1
- [I3] **Services Modeling and Distributed Simulation DEVS / HLA Supported**
Zacharewicz G., Alix T., Vallespir B.
In: Winter Simulation Conference 2009 (2009) Austin, Texas
Proceedings of 2008 EURO International Simulation Multi-conference
- [I4] **HLA Supported, Federation Oriented Enterprise Interoperability, Application to Aerospace Enterprises**
Zacharewicz G., Chen D., Vallespir B.
In: 2008 International Simulation Multi-conference (2008) Edinburgh

7.5 Sélection de 20 articles de Conférences avec Proceedings⁴

- [C1] **Using DEVS and CELL-DEVS for Modelling of Information Impact on Individuals in Social Network**
Merouane El Alaoui, Youssef Bouanan; Gregory Zacharewicz; Bruno Vallespir
Conference proceedings, APMS, Sep 2014, Ajaccio, France. pp. 409
- [C2] **Simulate enterprise conceptual models execution by coupling enterprise services and DEVS models using Workflow**
Hassan Bazoun; Judicael Ribault; Gregory Zacharewicz; Yves Ducq
Conference proceedings, The 11th I3M, Sep 2014, Bordeaux, France.
- [C3] **Modelling of Social Influence With DEVS And Cell-DEVS Formalism**
Youssef Bouanan; Grégory Zacharewicz; Bruno Vallespir
Conference proceedings, The 11th International Multidisciplinary Modeling & Simulation Multiconference, Sep 2014, Bordeaux, France, pp. 400
- [C4] **Business Process Simulation: Transformation of BPMN 2.0 to DEVS Models**
Hassan Bazoun; Youssef Bouanan; Gregory Zacharewicz; Hadrien Boyer; Yves Ducq
Conference proceedings, TMS part of SpringSim 2014, Apr 2014, Tampa, United States. pp. X

⁴ Parmi plus de 40 articles : <http://hal.archives-ouvertes.fr/aut/zacharewicz/>

- [C5] **Transformation of extended Actigram Star to BPMN2.0 and simulation model in the frame of model driven service engineering architecture**
 Hassan Bazoun; Gregory Zacharewicz; Yves Ducq; Hadrien Boyer
 In: DEVS 13 Proceedings of the Symposium on Theory of Modeling & Simulation - DEVS Integrative M&S Symposium, Apr 2013, San Diego, United States, pp. X
- [C6] **Orchestrating the interoperability Workflow within a transport simulation platform**
 Judicaël Ribault; Gregory Zacharewicz
 In: I3M: The 10th International Multidisciplinary Modelling & Simulation Multiconference, Sept 2013, Athens, Greece. pp. MAS 49
- [C7] **Adapting Simulation Modeling to Model-Driven Architecture for Model Requirement Verification**
 Fuqi Song; Gregory Zacharewicz; David Chen
 In: 3rd International Conference on Simulation and Modeling Methodologies, Technologies and Applications, Jul 2013, Reykjavik, Iceland., pp. 302-309
- [C8] **G-DEVS Model of Bottling Involved in a Interoperable Simulation**
 Gregory Zacharewicz; Norbert Giambiasi
 In: 2013 IFAC Conference on Manufacturing Modelling, Management, and Control, Jun 2013, Saint Petersburg, Russian Federation., pp. X
- [C9] **PSYOPS and CIMIC operations: from concepts to G-DEVS models**
 Colette Faucher; Gregory Zacharewicz; Maâmar El-Amine Hamri; Claudia Frydman
 In: 2012 Symposium on Theory of Modeling and Simulation - DEVS Integrative M&S Symposium, Mar 2012, Orlando, United States. TMS/DEVS '12, pp. X
- [C10] **Automatic generation of object-oriented code from DEVS graphical specifications**
 Maâmar El-Amine Hamri; Gregory Zacharewicz
 In: WSC '12 Winter Simulation Conference, Dec 2012, Berlin, Germany., pp. 409:1-409:12
- [C11] **An Architecture for Interoperability of Enterprise Information Systems Based on SOA and Semantic Web Technologies**
 Fuqi Song; Gregory Zacharewicz; David Chen
 In: 13th International Conference on Enterprise Information Systems (ICEIS), Jun 2011, Beijing, China. 13th International Conference on Enterprise Information Systems (ICEIS), 4, pp. 431-437
- [C12] **Harmonized and Reversible development framework for HLA based interoperable application**
 Zhiying Tu; Gregory Zacharewicz; David Chen
 In: Symposium On Theory of Modeling and Simulation (DEVS/TMS'11) part of Spring Simulation Multi-Conference 2011, Apr 2011, Boston, United States, pp. CD-ROM
- [C13] **GRAI-ICE Model Driven Interoperability Architecture for Developing Interoperable ESA**
 Lanshun Nie; Xiaofei Xu; Gregory Zacharewicz; David Chen; Dechen Zhan
 In: The international conference on Interoperability for Enterprise Software and Applications, Apr 2010, Coventry, UK. Interoperability for Enterprise Software and Applications, pp. 111-122
- [C14] **Unified Reversible Life Cycle for Future Interoperable Enterprise Distributed Information Systems**
 Zhiying Tu; Gregory Zacharewicz; David Chen **(Best Paper Award)*
 In: The international conference on Interoperability for Enterprise Software and Applications, Apr 2010, Coventry, France. Proceedings of The international conference on Interoperability for Enterprise Software and Applications, pp. 57-66
- [C15] **Short-Lived Ontology Approach for Agent/HLA Federated Enterprise Interoperability**
 Zacharewicz G., Chen D., Vallespir B.
 In : International Conference on Interoperability for Enterprise Software and Applications (2009) Beijing
- [C16] **Multi Agent/HLA Enterprise Interoperability (Short-Lived Ontology Based)**
 Zacharewicz G., Labarthe O., Chen D., Vallespir B. **(Best Paper Award)*
 In : The International Workshop on MAS part of I3M (2009) Puerto de la Cruz
- [C17] **HLA Multi Agent/Short-Lived Ontology Platform for Enterprise Interoperability**
 Zacharewicz G., Labarthe O., Chen D., Vallespir B.
 In : APMS2009 Advances in Production Management Systems International Conference on Advances in Production Management Systems (2009) Bordeaux
- [C18] **LSIS-DME: An Environment for Modeling and Simulation of DEVS Specifications**
 Hamri M. E.-A., Zacharewicz G.
 In : AIS-CMS International modeling and simulation multiconference (2007) Buenos Aires
- [C19] **Improving the Lookahead Computation in G-DEVS/HLA Environment**
 Zacharewicz G., Giambiasi N., Frydman C.
 In : Ninth IEEE Symposium on Distributed Simulation and Real-Time Applications (2005) Montreal
- [C20] **Improving the DEVS/HLA Environment**
 Zacharewicz G., Giambiasi N., Frydman C.
 In : 2005 DEVS Integrative M&S Symposium (2005) San Diego

8 Bibliographie

- Baati, L., Frydman, C. & Giambiasi, N., 2007. *LSIS_DME M&S environment extended by dynamic hierarchical structure DEVS modeling approach*. Norfolk, Virginia, ACM.
- Bakshy, E., Hofman, J. M., Mason, W. A. & Watts, D. J., 2011. *Everyone's an influencer: quantifying influence on twitter*. Hong Kong, ACM, p. 65-74.
- Bell, M., 2008. *Service-Oriented Modeling: Service Analysis, Design, and Architecture*. Wiley éd. Hoboken, NJ: s.n.
- Ben Salem, R., Grangel, R. & Bourey, J., 2008. A Comparison of Model Transformation Tools: Application for Transforming GRAI Extended Actigrams into Uml Activity Diagrams. *Computers in Industry*, 59(7), pp. 682-693.
- Benguria, G., Larrucea, X. & Elvesæter, B., 2007. *A Platform Independent Model for Service Oriented Architectures*. Bordeaux, Springer, pp. 23-32.
- Benjamin, P. & Akella, K., 2009. *Towards ontology-driven interoperability for simulation-based applications*. Austin, TX, Informa, pp. 1375-1386.
- Benjamin, P., Akella, K. & Verma, A., 2007. *Using ontologies for simulation integration*. Washington, D.C., IEEE, pp. 1081-1089.
- Berio, G., Mertins, K. & Jaekel, F., 2005. *Common Enterprise Modelling Framework for Distributed Organisations*. Prague, Elsevier, pp. 1530-1530.
- Berre, A. -J. et al., 2007. The ATHENA Interoperability Framework. Dans: Springer, éd. *Enterprise Interoperability II*. Londres: Gonçalves, Ricardo J. and Müller, Jörg P. and Mertins, Kai and Zelm, Martin, pp. 569-580.
- Bézivin, J., Jouault, F. & Paliès, J., 2005. *Towards Model Transformation Design Patterns*. s.l., s.n.
- Bourey, J.-P., 2011. *Modèles, Méta-modèles et transformations de modèles : les bases*. [En ligne] Available at: <http://www.easy-dim.org/reunions/supports-du-module-recherche-en-interoperabilite-des-systemes-de-lecole-des-jd-macs/4-Meta-Modelling%20JD%20MACS%2020110606.pdf> [Accès le 01 juin 2014].
- Bourey, J., Grangel Seguer, R., G., D. & Berre, A., 2007. *Report on Model Driven Interoperability*. [En ligne] Available at: <http://interop-vlab.eu/deliv/tg2-model-driven-interoperability/> [Accès le 01 juin 2014].
- Boyyé, H., Bazoun, H. & Belkelladi, K., 2014. *SLMToolBox: A Tool Set For Service Engineering*. Lisbon, Portugal, scitepress.
- Brown, P. et al., 1992. Class-based n-gram models of natural language. *Computational Linguistics*, Volume 18, pp. 467-479.
- C4ISR Architecture Working Group, 1998. *Levels of Information Systems Interoperability (LISI)*, s.l.: United States of America Department of Defense (DODAF).
- Camarinha-Matos, L., Afsarmanesh, H. & Ollus, M., 2008. ECOLEAD and CNO base concepts. Dans: S. US, éd. *Methods and Tools for Collaborative Networked Organizations*. s.l.:s.n., pp. 3-32.
- Camarinha-Matos, L. et al., 2013. *Collaborative environment for service-enhanced products*. s.l., s.n., pp. 374-379.
- CAPRICORN, 2009. *CAPRICORN Project*. [En ligne] Available at: <http://www.liophant.org/projects/capricorn/index.html> [Accès le 01 Septembre 2014].
- Cardoso, J. et al., 2012. *Open semantic service networks*. s.l., s.n.
- Ceausu, V. & Desprès, D., 2007. *A semantic case-based reasoning framework for text categorization*. Busan, Korea, Springer-Verlag, pp. 736-749.
- CELL-DEVS Collectif, 2013. *CELL-DEVS Models Samples*. [En ligne] Available at: www.sce.carleton.ca/faculty/wainer/wbgraf/doku.php?id=model_samples:start [Accès le 01 juin 2014].
- Cerbah, F., 2010. Learning Ontologies with Deep Class Hierarchies by Mining the Content of Relational Databases. Dans: F. Guillet, G. Ritschard, D. Zighed & B. H., éd. *Advances in knowledge discovery and management*. Heidelberg: Springer-Verlag, pp. 271-286.
- Çetinkaya, D., Verbraeck, A. & Seck, M., 2012. *Model Transformation from BPMN to DEVS in the MDD4MS Framework*. Orlando, ACM, pp. 304-309.
- Chappell, D. A., 2004. *Enterprise Service Bus*. O'Reilly Media éd. s.l.:s.n.
- Charalabidis, Y., Panetto, H., Loukis, E. & Mertins, K., 2008. Interoperability approaches for enterprises and administrations worldwide.. *The electronic journal for e-commerce tools and applications (eJeta)*, 2(3), pp. 1-10.
- Chen, D., Dassisti, M. & Elvesæter, B., 2007. *Enterprise Interoperability Framework and Knowledge Corpus*, s.l.: Final report Annex: Knowledge Pieces, Contract no.: IST-508 011, Deliverable DI.3-Annex.

- Chen, D. & Doumeingts, G., 2003. European Initiatives to develop interoperability of enterprise applications - basic concepts, framework and roadmap. *Journal of Annual reviews in Control*, 27(2), pp. 151-160.
- Chen, D., Knothe, T. & Doumeingts, G., 2009. *POP* meta-model for enterprise model interoperability*. Moscow, s.n.
- Chen, D., Vallespir, B. & Doumeingts, G., 1997. GRAI integrated methodology and its mapping onto generic enterprise reference architecture and methodology. *Computers in Industry*, 33(2-3), p. 387-394.
- Cohen, W., Ravikumar, P. & Fienberg, S., 2003. *A comparison of string distance metrics for name-matching tasks*. Mexico, s.n.
- COIN, 2011. *COIN Interprise Collaboration & Interoperability*. [En ligne] Available at: <http://www.coin-ip.eu/> [Accès le 01 Septembre 2014].
- Consortium_IDEAS, 2002. *Thematic Network, IDEAS Interoperability Development for Enterprise Application and Software – Roadmaps’, Annex 1 – Description of work*, s.l.: s.n.
- Cortellesa, V., Di Marco, A. & Inverardi, P., 2007. *Non-Functional Modeling and Validation in Model-Driven Architecture*. s.l., s.n.
- Crujssen, F., Cools, M. & Dullaert, W., 2007. Horizontal cooperation in logistics: opportunities and impediments. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 46(3), pp. 129-142.
- CSAIL-MIT, 2012. *JWI (the MIT Java Wordnet Interface)*, s.l.: s.n.
- Czarnecki, K. & Helsen, S., 2006. Feature-based survey of model transformation approaches. *IBM System Journal*, Volume 45, pp. 621-645.
- Davenport, T., 1993. *Process Innovation: Reengineering work through information technology*. arvard Business School Press éd. Boston: s.n.
- DGE, 2011. *Technologie Clés pour 2015 pour les transports*. [En ligne] Available at: http://www.entreprises.gouv.fr/files/files/directions_services/politique-et-enjeux/innovation/tc2015/technologies-cles-2015-transports.pdf [Accès le 01 Septembre 2014].
- Diallo, S., Padilla, J., Bozkurt, I. & Tolk, A., 2013. Modeling and Simulation as a Theory Building Paradigm. Dans: *Ontology, Epistemology, and Teleology for Modeling and Simulation*. s.l.:s.n., pp. 193-206.
- Diekmann, O. & Heesterbeek, J., 2000. *Mathematical Epidemiology of Infectious Diseases*. England: Wiley series on mathematical and computational biology.
- Ding, W. et al., 2009. *The Effects of Time Delay of Internet on Characteristics of Human Behaviors*. Okayama, Japan, IEEE.
- Dorsey, D. W. & Coovert, M. D., 2003. Mathematical Modeling of Decision making: A Soft and Fuzzy Approach to Capturing Hard Decisions. *Human Factors*, 45(1), p. 117-135.
- Doumeingts, G., 1984. *Méthode GRAI : méthode de conception des systèmes productives*, Bordeaux: Thèse de doctorat, Laboratoire d'Automatique et de Productique, Université Bordeaux I.
- Ducq, Y., Chen, D. & Vallespir, B., 2004. Interoperability in enterprise modelling: requirements and roadmap. *Advanced Engineering Informatics*, 18(4), pp. 193-203.
- Eclipse_Foundation, 2012. *BPMN2 modeler*. [En ligne] Available at: <http://eclipse.org/bpmn2-modeler/> [Accès le 01 Septembre 2014].
- El Haouzi, H., 2006. *Models simulation and interoperability using MDA and HLA*. Bordeaux, ISTE, pp. 277-284.
- ENSEMBLE, 2008. *ENSEMBLE*. [En ligne] Available at: <https://www.ensemble-fp7.eu/> [Accès le 01 juin 2014].
- Euzenat, J., 2004. *An API for Ontology Alignment*. Heidelberg, Springer, pp. 698-712.
- Euzenat, J., 2007. *Ontology matching*. Heidelberg: Springer.
- Euzenat, J., 2007. *Semantic precision and recall for ontology alignment evaluation*. Hyderabad, India, Morgan Kaufmann, pp. 348-353.
- Euzenat, J. et al., 2011. *Results of the ontology alignment evaluation initiative*. Bonn, Germany, s.n.
- Favre, L., 2010. *Model Driven Architecture for Reverse Engineering Technologies: Strategic Directions and System Evolution*. Hershey, PA: IGI Global.
- Fei, L., Ming, Y. & S., G., 2007. *Verification of Human Decision Models in Military Simulations*. Phuket, Thailand, IEEE, p. 363-368.
- FINES, 2012. *Research Roadmap 2025, Final Document, Version 3.0*. [En ligne] Available at: http://cordis.europa.eu/fp7/ict/enet/documents/fines-research-roadmap-v30_en.pdf [Accès le 01 Septembre 2014].

- FoF-ICT-2011.7.3, F. –, 2011. *Manufacturing Service Ecosystem Project- Annex 1 description of work*. [En ligne] Available at: <http://interop-vlab.eu/> [Accès le 01 Septembre 2014].
- François, J., Deschamps, J., Fontan, G. & Bourrieres, J., 2005. *Assessing the impact of control architectures on Supply Chains performances*. s.l., s.n.
- Fujimoto, R., 2000. *Parallel and Distributed Simulation System*. NY, NY: Ed. Wiley Interscience.
- FUTURPROD, 2013. *Les systèmes de Production du Futur, Atelier de réflexion, Rapport Final*. [En ligne] Available at: <http://www.agence-nationale-recherche.fr/informations/actualites/detail/arp-futurprod-rapport-final-en-ligne/> [Accès le 01 Juin 2014].
- Gandon, F., Corby, O., Diop, I. & Lo, M., 2008. *Distances sémantiques dans des applications de gestion d'information utilisant le web sémantique*. Sophia-Antipolis, France, s.n.
- Garredu, S., Vittori, E., Santucci, J.-F. & Bisgambiglia, P.-A., 2012. *A Meta-Model for DEVS Designed following Model Driven Engineering specifications*. Rome, Italie, SciTePress, pp. 152-157.
- Giambiasi, N., Escude, B. & Ghosh, S., 2000. G-DEVS A Generalized Discrete Event Specification for Accurate Modeling of Dynamic Systems. *Transactions of the SCS International*, 17(3), pp. 120-134.
- Goble, C. et al., 2010. myExperiment: a repository and social network for the sharing of bioinformatics workflows. *Nucleic acids research*, pp. W677-82.
- Google, 2014. *Encoded Polyline Algorithm Format*. [En ligne] Available at: <https://developers.google.com/maps/documentation/utilities/polylinealgorithm> [Accès le 01 Septembre 2014].
- Google, 2014. *Google Maps Documentation*. [En ligne] Available at: <https://developers.google.com/maps/documentation/directions/> [Accès le 01 Septembre 2014].
- Grabot, B. & Collectif, 2012. *Prospective STP*. [En ligne] Available at: <http://www.univ-valenciennes.fr/gdr-macs/prospectives> [Accès le 01 Septembre 2014].
- Grangel Seguer, R., Cutting-Decelle, A. & Bourey, J., 2008. *A UML profile for transforming GRAI Extended Actigrams into UML*. Séoul, Korea, s.n., p. Paper ThB24.3.
- Granitzer, M. et al., 2010. Ontology Alignment—A Survey with Focus on Visually Supported Semi-Automatic Techniques. *Future Internet*, 2(3), pp. 238-258.
- Gruber, T., 1993. A translation approach to portable ontology specifications. *Knowledge Acquisition*, 5(2), pp. 199-220.
- GS1, 2011. *Portail GS1 France*. [En ligne] Available at: <http://www.gs1.fr> [Accès le 01 Septembre 2014].
- H2020, 2014. *Projets Horizon 2020*. [En ligne] Available at: <http://www.horizon2020.gouv.fr> [Accès le 01 Septembre 2014].
- Hardis, 2012. [En ligne] Available at: <http://www.hardis.fr> [Accès le 01 juin 2014].
- Hope, D., 2012. *JWS (Java WordNet::Similarity)*. [En ligne] Available at: <http://www.sussex.ac.uk/Users/drh21/> [Accès le 2014].
- Huang, J., Dang, J., Vidal, J. & Huhns, M., 2007. *Ontology Matching Using an Artificial Neural Network to Learn Weights*. Hyderabad, India, s.n.
- Hull, D. et al., 2006. Taverna: a tool for building and running workflows of services. *Nucleic acids research*, pp. W729-32.
- IEEE, 2000. *Standard for Modeling and Simulation (M&S) High Level Architecture (HLA) - Federate Interface Specification*. New York, NY, Brevet n° IEEE std 1516.2-2000.
- IEEE, 2003. *Standard for Modeling and Simulation (M&S) High Level Architecture (HLA) - Federation Development and Execution Process (FEDEP)*. s.l. Brevet n° std 1516.3-2003.
- IEEE, 2010. *Standard for Modeling and Simulation (M&S) High Level Architecture (HLA)-- Framework and Rules*. New York, Brevet n° 1516-2010 HLA Evolved.
- INRIA, 2012. [En ligne] Available at: <http://alignapi.gforge.inria.fr/> [Accès le 01 Septembre 2014].
- INTEROP V-Lab, 2012. [En ligne] Available at: <http://www.interop-vlab.eu/> [Accès le 01 Septembre 2014].
- INTEROP-NOE, 2006. *INTEROP - Network Of Excellence*. [En ligne] Available at: www.cimosa.de/Modelling/INTEROP.html [Accès le 01 Septembre 2014].
- ISO_TC184, 1999. *ISO TC184*. s.l. Brevet n° ISO TC184/SC5/WG1 14258.
- IST, 2006. *'Enterprise Interoperability Research Roadmap', Final Version, (Version 4.0)*. [En ligne] Available at: http://cordis.europa.eu/ist/ict-entnet/ei-roadmap_en.htm [Accès le 01 Septembre 2014].

- ISTA3, 2008. *ISTA3*. [En ligne] Available at: <https://research.linagora.com/display/ista3fr> [Accès le 01 Septembre 2014].
- Jaekel, F., 2005. *Distributed Federated Simulation of Supply Chains*. [En ligne] Available at: http://interop-vlab.eu/ei_public_deliverables [Accès le Septembre 2014].
- Jaro, M., 1995. Probabilistic linkage of large public health data files. *Statistics in Medicine*, Volume 14, pp. 491-498.
- Johnson, S. K. & Brown, A. W., 2006. A Model-Driven Development Approach to Creating Service-Oriented Solutions. *Service-Oriented Computing – ICSOC 2006*, Volume 4294, pp. 624-636.
- Jouault, F., Allilaire, F., Bezivin, J. & Kurtev, I., 2008. ATL: A model transformation tool. *Science of Computer Programming*, 72(1-2), pp. 31-39.
- Jouault, F. B. H., Allilaire, F. & others, a., 2014. *ATL User Guide – The ATL Language*. [En ligne] Available at: <http://wiki.eclipse.org/ATL> [Accès le 01 Avril 2014].
- Kubota, N. & Nishida, K., 2006. *Prediction of Human Behavior Patterns based on Spiking Neurons*. s.l., IEEE.
- Labarthe, O., Espinasse, B., Ferrarini, A. & Montreuil, B., 2007. Toward a Methodological Framework for Agent-Based Modelling and Simulation of Supply Chains in a Mass Customization Context. *Simulation Modelling Practice and Theory*, 15(2), pp. 113-136.
- Leigh, J., Johnson, A. & DeFanti, T., 1997. CAVERN: A Distributed Architecture for Supporting Scalable Persistence and Interoperability. *Collaborative Virtual Environments. Virtual Reality: Research, Development and Applications*, 2(2), pp. 217-237.
- Li, J., Tang, J., Li, Y. & Luo, Q., 2009. RiMOM: A Dynamic Multistrategy Ontology Alignment Framework. *IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering*, Volume 21, pp. 1218-1232.
- Lin, D., 1998. *An Information-Theoretic Definition of Similarity*. s.l., Morgan Kaufmann, pp. 296-304.
- Mao, M., Peng, Y. & Spring, M., 2010. An adaptive ontology mapping approach with neural network based constraint satisfaction. *Web Semantics: Science, Services and Agents on the World Wide Web*, Volume 8, pp. 14-25.
- Maynard, D., Funk, A. & Peters, W., 2009. *SPRAT: a tool for automatic semantic patternbased ontology population*. Trento, Italy, s.n.
- McNeill, K., 2012. *How to extend the Eclipse Ecore metamodel*. [En ligne] Available at: <http://www.ibm.com/developerworks/library/os-eclipse-emfmetamodel/index.html> [Accès le 02 Mai 2014].
- Mittal, S. a. R. M. J., 2013. Modeling and Simulation-Based Systems Engineering. Dans: *Netcentric System of Systems Engineering with DEVS Unified Process*. Boca Raton, FL: CRC Press, pp. 610-613.
- Mochol, M., Jentzsch, A. & Euzenat, J., 2006. *Applying an Analytic Method for Matching Approach Selection*. Obidos, Portugal, P. Shvaiko, J. Euzenat, N.F. Noy, H. Stuckenschmidt, V.R. Benjamins, M. Uschold.
- MSEE, 2012. [En ligne] Available at: <http://msee-ip.eu> [Accès le Septembre 2014].
- NASA, 2014. *The Simulation Exploration Experience (SEE)*. [En ligne] Available at: <http://www.exploresim.com/> [Accès le 8 October 2014].
- Ngo, D., Bellahsene, Z. & Coletta, R., 2011. *YAM++ -- Results for OAEI 2011..* s.l., s.n., pp. 228-235.
- NIST, 2010. *IDEF, Integrated DEFinition Methods*. [En ligne] Available at: <http://www.idef.com/IDEF0.htm> [Accès le 01 Septembre 2014].
- OAEI, 2011. *Ontology Alignment Evaluation Initiative (OAEI) 2011 Benchmarking Data Sets*, s.l.: s.n.
- OMG, 2000. *XML Metadata Interchange (XMI)*. [En ligne] Available at: <http://xml.coverpages.org/OMG-XMI-ad20010612.pdf> [Accès le 01 Septembre 2014].
- OMG, 2003. *MDA Guide Version 1.0.1*. [En ligne] Available at: <http://www.omg.org/mda> [Accès le 01 Septembre 2014].
- OMG, 2011. *Business Process Model and Notation (BPMN) version 2.0*. [En ligne] Available at: <http://www.omg.org/bpmn> [Accès le 01 Septembre 2014].
- OMG, 2012. *Object Constraint Language (OCL)*. [En ligne] Available at: <http://www.omg.org/spec/OCL/> [Accès le 01 Septembre 2014].
- Ören, T., 1971. *GEST: A Combined Digital Simulation Language for Large-Scale Systems*. Tokyo, Japan, s.n., pp. B-1/1 - B-1/4.
- Ören, T., 1977. Simulation - as it has been, is and should be. *Simulation*, 29(5), pp. 182-183.
- Ören, T., 1996. *Intelligent Software Agents: Basic Concepts and Internet*. Istanbul, Turkey, s.n.

- Ören, T. I., Ghasem-Aghaee, N. & Yilmaz, L., 2007. *An ontology-based dictionary of understanding as a basis for software agents with understanding abilities*. s.l., s.n., pp. 19-27.
- Orriëns, B., J., Y. & Papazoglou, M. P., 2003. Model Driven Service Composition. *Service-Oriented Computing - ICSOC 2003 Lecture Notes in Computer Science*, Volume 2910, pp. 75-90.
- Panetto, H., Zelm, M. & Scannapieco, M., 2004. *Interoperability Research for Networked Enterprises Applications and Software*. Larnaca, Cyprus, s.n.
- Pedersen, T., Patwardhan, S. & Michelizzi, J., 2004. *WordNet::Similarity: measuring the relatedness of concepts*. Boston, Ma, s.n., pp. 38-41.
- Pirró, G. & Talia, D., 2010. UFOME: An ontology mapping system with strategy prediction capabilities. *Data & Knowledge Engineering*, 69(5), pp. 444-471.
- Pollacia, L. F., 1989. A survey of discrete event simulation and state-of-the-art discrete event languages. *ACM SIGSIM Simulation Digest*, 20(3), pp. 8-25.
- PoRTiCo, 2012. *PoRTiCo project*. [En ligne] Available at: <http://www.porticoproject.org/> [Accès le 01 Septembre 2014].
- PRODIGE, 2009. *ANR PRODIGE*. [En ligne] Available at: <http://anr-prodige.com/> [Accès le 01 septembre 2014].
- protégé, 2010. *A free, open-source ontology editor and framework for building intelligent systems*. [En ligne] Available at: <http://protege.stanford.edu/> [Accès le 01 Septembre 2014].
- PSL, 2003. *Process Specification Language*. [En ligne] Available at: www.mel.nist.gov/psl/ [Accès le 01 Septembre 2014].
- Quesnel, G. et al., 2012. Virtual Laboratory Environment : un environnement multimodélisation et de simulation de systèmes complexes. *Studia Informatica Universalis*, 10(1), pp. 205-234.
- Rabe, M. & Jaekel, F., 2002. *The MISSION Project*. s.l., s.n., pp. 235-242.
- Rada, R., Mili, H., Bicknell, E. & Blettner, M., 1989. Development and Application of a Metric on Semantic Nets. *IEEE Systems, Man, and Cybernetics*, 19(1), pp. 17-30.
- Richardson, L. & Ruby, S., 2007. *RESTful Web Services*. s.l.:O'Reilly Media.
- Ritze, D., Meilicke, C., Sváb-Zamazal, O. & Stuckenschmidt, H., 2008. *A Pattern-based Ontology Matching Approach for Detecting Complex Correspondences*. s.l., P. Shvaiko, J. Euzenat, F. Giunchiglia, H. Stuckenschmidt, N.F. Noy, A. Rosenthal.
- Saaty, T., 1990. How to make a decision: The analytic hierarchy process. *European Journal of Operational Research*, Volume 48, pp. 9-26.
- Saaty, T. & Vargas, L., 2001. The Seven Pillars of the Analytic Hierarchy Process. Dans: S. US, éd. *Models, methods, concepts & applications of the analytic hierarchy process*. s.l.:s.n., pp. 27-46.
- Sari, Y., Hassan, M. & Zamin, N., 2010. *Rule-based pattern extractor and named entity recognition: A hybrid approach*. s.l., s.n., pp. 563-568.
- Seck, M., Frydman, C. & Giambiasi, N., 2004. *Using DEVS for Modeling and Simulation of Human Behaviour*. s.l., s.n., pp. 692-698.
- Shang, H. & Wainer, A., 2005. *A Model of Virus Spreading Using Cell-DEVS*. s.l., Lecture Notes in Computer Science, pp. 373-377.
- Silver, G. A. et al., 2011. DeMO: an ontology for discrete-event modeling and simulation. *Simulation*, 87(9), pp. 747-773.
- SIMID, 2011. *FUI SIMID*. [En ligne] Available at: <http://www.simid-project.eu/> [Accès le 01 Septembre 2014].
- SISO, 2000. *Simulation Interoperability Standards Organization*. [En ligne] Available at: <http://sisostds.org/> [Accès le 01 Septembre 2014].
- Song, H. & Kim, T., 1994. *The DEVS framework for discrete event systems control*. Gainesville, FL, USA, ACM, pp. 228 - 234.
- Sun, Z., 2007. *Multi-Agent Based Modeling: Methods and Techniques for Investigating Human Behaviors*. s.l., IEEE, pp. 779-783.
- Šváb-Zamazal, O. & Svátek, V., 2011. *OWL Matching Patterns Backed by Naming and Ontology Patterns*. Znalosti, Slovakia, s.n.
- SYGIC, 2014. *Sygic / Bringing life to maps*. [En ligne] Available at: <https://www.sygic.com/> [Accès le 01 Septembre 2014].

- Tchapnga, R., Deschamps, J.-C. & Dupas, R., 2012. *A Grasp with variable neighborhood descent for the pickup and delivery problem with time windows*. Quebec, s.n.
- Thoben, K.-D., Jagdev, H. & Eschenbcher, J., 2001. *Extended Products: evolving traditional product concepts*. Bremen, Germany, s.n.
- Tidwell, D., 2008. *XSLT*. 2nd Edition éd. s.l.:O'Reilly.
- Timmers, P., 1998. Business Models for Electronic Markets. *Journal on Electronic Markets*, 8(2), pp. 3-8.
- Tolk, A., 2012. *Ontology, Epistemology, and Teleology for Modeling and Simulation: Philosophical Foundations for Intelligent M&S Applications*. Springer éd. s.l.:s.n.
- Tolk, A., 2013. Truth, Trust, and Turing - Implications for Modeling and Simulation. Dans: *Ontology, Epistemology, and Teleology for Modeling and Simulation*. Berlin: Springer-Verlag, pp. 1-26.
- Tolk, A. & Muguira, J., 2003. *The Levels of Conceptual Interoperability Model*. Orlando, Florida, s.n.
- Touraille, L., Traoré, M. & Hill, D., 2011. *A model-driven software environment for modeling, simulation and analysis of complex systems*. s.l., s.n., pp. 229-237.
- Toutanova, K., Klein, D., Manning, C. & Singer, Y., 2003. *Feature-rich part-of-speech tagging with a cyclic dependency network*. Edmonton, Canada, Association for Computational Linguistics, pp. 173-180.
- Touzi, J., 2007. *Aide à la conception de Système d'Information Collaboratif support de l'interopérabilité des entreprises*, Toulouse: Phd Thesis INPT.
- Tran, Q.-V., Ichise, R. & Ho, B.-Q., 2011. *Cluster-based similarity aggregation for ontology matching*. s.l., s.n.
- Tscheschner, W., 2010. *Transformation from EPC to BPMN*, Potsdam, Germany: Oryx Research.
- Turnitsa, C., Padilla, J. & Tolk, A., 2010. *Ontology for Modeling and Simulation*. Baltimore, MD, IEEE, pp. 643-651.
- UEML, 2003. [En ligne] Available at: <http://www.uemlwiki.org/> [Accès le 10 janvier 2009].
- Ullberg, J., Chen, D. & Johnson, P., 2009. Barriers to Enterprise Interoperability, In Enterprise Interoperability. *Business Information Processing*, pp. 13-24.
- Vaidya, O. & Kumar, S., 2006. Analytic hierarchy process: An overview of applications. *European Journal of Operational Research*, Volume 169, pp. 1-29.
- Van Der Aalst, W. M. P., Barros, A. P., Hofstede, A. H. M. t. & Kiepuszewski, B., 2000. *Advanced Workflow Patterns*. s.l., s.n., pp. 18-29.
- W3C, 2001. *WSDL*. [En ligne] Available at: <http://www.w3.org/TR/wsdl> [Accès le 01 Septembre 2014].
- Wainer, G., 2002. CD++: a toolkit to develop DEVS models. *Software - Practice and Experience*, 32(13), pp. 1261-1306.
- Wainer, G., 2009. *Discrete-Event Modeling and Simulation: a Practitioner's approach*. s.l.:CRC Press.
- Wainer, G., 2013. *DEVS TOOLS*. [En ligne] Available at: <http://www.sce.carleton.ca/faculty/wainer/standard/tools.htm> [Accès le 01 Septembre 2014].
- Weske, M., 2007. *Business Process Management: Concepts, Languages, Architectures*. Berlin Heidelberg. New York: Springer-Verlag.
- WfMC, 1999. *Terminology & Glossary*, Winchester, Hampshire, United Kingdom: Workflow Management Coalition.
- WfMC, 2005. *Workflow Process Definition Interface -- XML Process Definition Language (XPDL)*, Winchester, Hampshire, United Kingdom: Workflow Management Coalition.
- Winkler, W., 1999. *The state of record linkage and current research problems*, s.l.: U.S. Bureau of the Census.
- Wood, S. K. et al., 2008. A Model-Driven Development Approach to Mapping UML State Diagrams to Synthesizable VHDL. *IEEE Transactions on Computers*, 57(10), pp. 1357-1371.
- Wooldridge, M., 2002. *An Introduction to Multi-agents Systems*. New York, NY: Wiley.
- Xinxin, L., 2011. *Design and Development for Transformation from GRAI to BPMN module and Semantic Annotations for BPMN module*, Bordeaux: University of Bordeaux 1.
- Yan, W., Zanni-Merk, C. & Rousselot, F., 2011. *Matching of different abstraction level knowledge sources: the case of inventive design*. Kaiserslautern, Germany, Springer, pp. 445-454.
- Zacharewicz, G., Frydman, C. & Giambiasi, N., 2008. G-DEVS/HLA Environment for Distributed Simulations of Workflows. *Simulation*, 84(5), p. 197-213.
- Zeigler, B., 1976. *Theory of Modeling and Simulation*. New York: John Wiley.

Zeigler, B. P. & Hammonds, P., 2007. *Modeling & Simulation-Based Data Engineering: Introducing Pragmatics into Ontologies for Net-Centric Information Exchange*. s.l.:Academic Press.

Zeigler, B., Praehofer, H. & Kim, T., 2000. *Theory of Modeling and Simulation*. New York, NY: Academic Press.

Zhang, H., Wang, H. & Chen, D., 2007. *A multidisciplinary collaborative design system in a distributed environment*. Melbourne, Australia, IEEE, pp. 233-239.

Zhong, J., Zhu, H., Li, J. & Yu, Y., 2002. *Conceptual Graph Matching for Semantic Search*. Borovets, Bulgaria, Springer Verlag, LNCS 2393, pp. 92-106.