Nancy-Université
Université Henri Poincaré

AVERTISSEMENT

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

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

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

➢ Contact SCD Nancy 1 : theses.sciences@scd.uhp-nancy.fr

LIENS

Code de la Propriété Intellectuelle. articles L 122. 4
Code de la Propriété Intellectuelle. articles L 335.2- L 335.10
http://www.cfcopies.com/V2/leg/leg_droi.php
http://www.culture.gouv.fr/culture/infos-pratiques/droits/protection.htm

Nancy-Université
Université Henri Poincaré

U.F.R. Sciences et Technologies

École Supérieure d'Informatique et Applications de Lorraine

École Doctorale IAEM Lorraine

Département de Formation Doctorale Automatique

Thèse

Présentée pour l'obtention du titre de

Docteur de l'Université Henri Poincaré, Nancy 1

en Automatique, Traitement du Signal et des Images, Génie Informatique

par

Esma YAHIA

CONTRIBUTION A L'EVALUATION DE L'INTEROPERABILITE SEMANTIQUE ENTRE SYSTEMES D'INFORMATION D'ENTREPRISES : APPLICATION AUX SYSTEMES D'INFORMATION DE PILOTAGE DE LA PRODUCTION

Soutenue publiquement le 15 septembre 2011 devant la commission d'examen composée de :

Président :	
M. Jean-Pierre BOUREY	Professeur à l'École Centrale de Lille
Rapporteurs :	
M. Yves DUCQ	Professeur à l'Université de Bordeaux 1
M. Michaël PETIT	Professeur aux Facultés Universitaires Notre-Dame de la Paix, Belgique
Examinateurs :	
M. Ricardo JARDIM-GONCALVES	Associate Professor à l'Université Nouvelle de Lisbonne, Portugal
M. Hervé PANETTO	Professeur à l'UHP Nancy I (Directeur de thèse)
M. Alexis AUBRY	Maître de conférences à l'UHP Nancy I (Encadrant de thèse)

Centre de Recherche en Automatique de Nancy
Faculté des Sciences et Technologies – 54500 Vandœuvre-lès-Nancy

A mes parents, mon mari,

Au petit ange que j’ai hâte de rencontrer.

Remerciements

L'aboutissement de cette thèse a été le fruit d'un travail collectif, des longs moments d'échanges et de discussions avec de nombreuses personnes. Je reconnais que chacune a apporté, à des degrés divers, mais avec une égale bienveillance, une contribution positive à la finalisation de cette thèse. Je tiens à remercier ces personnes d'avoir fait de ces trois années de thèse un souvenir inoubliable.

Je pense particulièrement à mes encadrants: Hervé Panetto, professeur à l'UHP/ESIAL et Alexis Aubry, maître de conférences à l'UHP qui ont accepté de diriger cette thèse et ont participé à son aboutissement dans les meilleures conditions grâce à leurs conseils et remarques. Je remercie Hervé, pour le temps qu'il m'a accordé et les multiples discussions scientifiques qui ont participé à l'avancement de cette thèse. Son expertise, sa pertinence, son enthousiasme pour la recherche et sa bonne humeur m'ont poussé à donner de mon mieux. Je remercie Alexis dont j'ai apprécié les qualités professionnelles et humaines pour son esprit critique et sa capacité à prendre du recul qui ont été des atouts importants pour la réussite de ce travail de thèse. Son aide si précieuse, sa présence et son soutien constant m'ont été source de motivation, de réconfort et de persévérance.

Je tiens également à remercier Alain Richard, directeur du CRAN de m'avoir permis d'effectuer ma thèse au sein du laboratoire et André Schaff, directeur de l'ESIAL de m'avoir accueillie dans l'école comme monitrice et de m'avoir encouragée.

Je tiens à remercier M. Michaël Petit, professeur aux Facultés Universitaires Notre-Dame de la Paix, et M. Yves Ducq, professeur à l'Université de Bordeaux 1 pour avoir accepté de rapporter sur mes travaux de thèse, pour leur lecture attentive du manuscrit et pour leurs remarques constructives qui m'ont permis d'améliorer la qualité de mon manuscrit. Je tiens à remercier également M. Ricardo Jardim-Goncalves qui a accepté d'examiner les travaux présentés dans ce mémoire. Je suis reconnaissante à M. Jean-Pierre Bourey, pour avoir accepté de présider le jury de thèse et d'avoir apporté sa caution scientifique à mon travail.

Mes remerciements s'adressent à toutes les personnes que j'ai côtoyées au CRAN durant trois ans avec qui j'ai partagé des moments agréables que ce soit à la BSR ou en dehors du laboratoire. J'ai une pensée particulière à : Leila, Gabriela, Mario, Dragos, Pierre, Yan et Vicky. Je remercie notamment l'ensemble des doctorants, maîtres de conférences et ingénieurs pour les moments de partage à la BSR : David, Pascale, Sylvain, Jérémy, Idriss, Ludovic, Thomas, Boutheina, William, Yongxin, Rémi, Alexandre, Fabien, Gilbert, Carlos, Cheikh…

Mes derniers et non moins profonds remerciements iront à ma famille qui m'a soutenue et encouragée ; A mon père et ma mère pour leur affection et confiance et à mes sœurs : Insaf, Faten et Fadoua pour leur encouragement et leur soutien. Je ne remercierai jamais assez mon mari Hatem pour son support au quotidien pendant la rédaction de cette thèse. Merci pour ta confiance ainsi que le soutien inconditionnel que tu as su m'apporter. Ta présence à mes côtés m'a permis de dépasser toutes les épreuves que j'ai rencontrées sur mon chemin. J'ai aussi une affectueuse pensée à la « créature » en moi qui m'a accompagnée pendant la rédaction du manuscrit, et dont l'arrivée m'a poussée à tout donner dans l'espoir de la rencontrer bientôt.

Que toutes ces personnes reçoivent ici l'expression de ma profonde gratitude.

Tables des matières

Remerciements **5**

Tables des matières **7**

Introduction **11**
1. Introduction générale et démarche de réflexion 11
2. Hypothèses de travail 14
3. Structure du mémoire de thèse 14

Chapitre 1 : Interopérabilité sémantique des Systèmes d'Information d'Entreprises : contexte, caractérisation et état de l'art **17**
1. Systèmes d'information d'entreprises collaboratives 17
   1.1. Typologie des collaborations inter-entreprises 18
   1.2. Les Systèmes d'Information pour la mise en œuvre des collaborations inter-entreprises 20
2. Interopérabilité des Systèmes d'Informations 21
   2.1. Définitions et types d'interopérabilité 21
   2.2. Les barrières à l'interopérabilité 23
   2.3. Coûts relatifs à la non-interopérabilité et à l'interopérabilité partielle 25
   2.4. Effets d'une interopérabilité partielle ou d'une non-interopérabilité 27
3. Évaluation de l'interopérabilité des systèmes d'information d'entreprises 28
   3.1. Que signifie évaluer l'interopérabilité ? 28
   3.2. État de l'art sur l'évaluation de l'interopérabilité 29
4. Notre stratégie d'Évaluation de l'interopérabilité 44
   4.1. Positionnement 44
   4.2. Scénario 45
   4.3. Structure de notre proposition d'évaluation 46
5. Conclusion 47

Chapitre 2 : Explicitation et structuration de la sémantique des systèmes d'information d'entreprises **49**
1. Caractéristiques des modèles conceptuels des systèmes d'information d'entreprises 50
   1.1. Constats 50
   1.2. Les conflits sémantiques 53
   1.3. La sémantique des modèles d'entreprises 54
   1.4. Problématique : Explicitation de la sémantique métier 56
2. L'approche d'explicitation de la sémantique 57
   2.1. Etape 1 : rétro-ingénierie 58
   2.2. Etape 2 : injection de la sémantique métier 59
   2.3. Etape 3 : transformation « Fact oriented » 60

3. Mise en évidence de la structure de la sémantique 63
3.1. Définition de la sémantique métier centrale et étendue 63
3.2. Quelques définitions mathématiques 63
3.3. Identification des blocs sémantiques 66
4. Conclusion 78

Chapitre 3 : Formalisation et évaluation de l'interopérabilité sémantique 79
1. Formalisation des relations sémantiques 81
1.1. Notre proposition de formalisation 81
1.2. Les approches d'identification des relations sémantiques 85
2. Les caractéristiques de l'interopérabilité sémantique 87
2.1. Les propriétés de l'interopérabilité sémantique 87
2.2. Les degrés de l'interopérabilité sémantique 90
3. Évaluation de l'interopérabilité sémantique 93
3.1. Approche d'évaluation de l'interopérabilité sémantique 94
3.2. Évaluation de l'interopérabilité des sous-systèmes 101
4. Conclusion 107

Chapitre 4 : Prototypage et application à un problème d'interopérabilité B2M 109
1. Prototypage de l'approche d'évaluation de l'interopérabilité 110
1.1. Présentation du méta-modèle 110
1.2. Implémentation semi-automatique de l'évaluation de l'interopérabilité 111
2. Cas d'étude : Processus d'achat de la matière première à l'AIPL-PRIMECA 112
2.1. Présentation du cas d'étude 112
2.2. Approche d'explicitation et de structuration de la sémantique des systèmes d'information 112
3. Approche de formalisation et d'évaluation de l'interopérabilité des systèmes d'information 119
3.1. Identification des relations d'interopérabilité Rc 119
3.2. Evaluation du degré d'interopérabilité 121
3.3. Stratégies d'amélioration des niveaux d'interopérabilité 126
4. Formalisation et évaluation de l'interopérabilité des sous-systèmes d'information 132
4.1. Approche de formalisation des relations d'interopérabilité sémantiques RSB 132
4.2. Évaluation de l'interopérabilité des sous-systèmes d'information 136
5. Conclusion 139

Conclusion générale et Perspectives 141
1. Conclusion générale 141
2. Limites et perspectives de nos travaux 142

Liste des Acronymes 145

Liste de figures 147

Liste des tableaux 149

Bibliographie 151

Introduction

1. Introduction générale et démarche de réflexion

Pour demeurer compétitives, de plus en plus d'entreprises sont amenées à collaborer, de manière opportuniste ou stabilisée, d'une façon durable ou éphémère, avec d'autres entreprises dans l'objectif d'optimiser les coûts et les délais de production, ainsi que la qualité et la commercialisation de leurs produits et/ou services (Thoben et Jagdev 2001). Ces entreprises collaboratives s'organisent, désormais, dans le cadre de réseaux d'entreprises que ce soit sous la forme d'entreprises étendues ou d'entreprises virtuelles (Bititci, et al. 2004) (Camarinha-Matos et Afsarmanesh 2008).

Définies comme telles, ces entreprises collaboratives peuvent être assimilées à un système réticulaire de systèmes d'entreprises ouvert (Oberndorf 1998), et par extension le Système d'Information (SI) de ce réseau peut être lui-même considéré comme un système réticulaire de SI. La spécification d'un tel réseau de SI implique d'évoluer du seul paradigme d'intégration vers un paradigme d'interopération (Fisher 2006) *où l'agrégation est le mécanisme « de construction » des relations entre des SI distribués, et participant au pilotage du Système Entreprise* (Auzelle 2009). Une nouvelle forme de collaboration, matérialisée par le concept de Système-de-Systèmes a été introduite et caractérisée par (Maier 1996) puis largement étudiée par (Arnold et Brook 2001), (Kaffenberger et Fischer 2001), (P. Chen 2005) et (Carney, Fisher et Place 2005).

Définition : Système-de-Systèmes (INCOSE 2006)[1]

« Systems-of-Systems (SoS) are defined as an interoperating collection of component systems that produce results unachievable by the individual systems alone. »

Par extension, (Auzelle 2009) a considéré que la collaboration opportune de systèmes d'information distribués, hétérogènes et autonomes peut être assimilée à un Système-de-Systèmes d'Information (SdSI), dans lequel chaque SI est considéré comme un « composant sur étagère » (COTS[2]) collaborant à une mission commune. Une des exigences traduite de ce

[1] INCOSE : INternational COuncil on Systems Engineering – http://www.incose.org

[2] "COTS (Commercial off-the-shelf) is a term for software or hardware, generally technology or computer products, that are ready-made and available for sale, lease, or license to the general public …The motivation for using COTS components is that they will reduce overall system development costs and involve less development time because the components can be bought or licensed instead of being developed from scratch

besoin de collaboration concerne la capacité de ces composants à interopérer, c'est-à-dire leur interopérabilité, plus au moins totale. (Ducq 2007) considère l'interopérabilité des systèmes comme une exigence de performance particulière de l'entreprise.

La satisfaction de cette exigence doit être vérifiée *a priori* pour chaque composant participant potentiellement à l'émergence d'un SdSI. La mise en œuvre de ces composants nécessite une ingénierie de la spécification de leur paramétrage ou de leur personnalisation, dans le contexte de leur implication dans un SdSI, en tenant compte d'une exigence d'interopérabilité. L'allocation de cette exigence à chacun des composants, dans des contextes potentiellement changeant de coopérations intra et inter-entreprises, nous amène à étudier leurs interactions à travers leurs modèles conceptuels respectifs.

La non satisfaction de l'exigence d'interopérabilité engendre des coûts non négligeables dus principalement au temps et aux ressources mis en place pour développer des interfaces d'échange d'informations et de partage des connaissances (interopérabilité technique) suivant une sémantique commune (interopérabilité sémantique) et pour former les acteurs et adapter les procédures organisationnelles (interopérabilité organisationnelle). Ceci a pour conséquence d'influer négativement sur la performance globale des entreprises et précisément sur les coûts et les délais d'obtention des services attendus. Par exemple, déjà en 1999, les coûts de non-interopération au niveau de la chaine logistique de l'industrie automobile américaine étaient estimés à un milliard de dollars par an (Tassey, Brunnermeier et Martin 1999).

La question scientifique à laquelle nous cherchons une réponse peut alors être formulée ainsi :

> Comment évaluer, *a priori*, qualitativement et quantitativement, si l'exigence d'interopérabilité sémantique entre plusieurs systèmes d'entreprises est satisfaite ?

Après formalisation, quantification et qualification de cette exigence d'interopérabilité, nous nous focalisons sur l'étude de sa satisfaction par la spécification d'un système de mesure. Ce système, composante d'un système projet, met en œuvre un outillage méthodologique et mathématique à la disposition des ingénieurs en charge du paramétrage ou de la personnalisation des composants.

… However, since COTS software specifications are written by external sources, government agencies are sometimes wary of these products because they fear that future changes to the product will not be under their control."(Source Wikipedia)

La contribution majeure de cette thèse concerne ainsi la spécification et le prototypage du système de mesure sur la base d'une approche sémantique pour l'étude des modèles conceptuels de SI, et la formalisation d'un ensemble de métriques permettant d'évaluer quantitativement et qualitativement le degré d'interopérabilité sémantique potentielle ou effective entre différents SI, à travers leurs modèles conceptuels statiques respectifs (Figure 1.).

Dans l'ensemble de nos travaux de thèse, nous étudierons la sémantique métier portée par les modèles conceptuels et non la sémantique formelle des modèles considérés.

Selon (Blanc 2006), la mise en œuvre d'une stratégie d'amélioration des performances des entreprises collaboratives doit s'appuyer principalement sur une méthodologie d'évaluation de l'interopérabilité. Ainsi, si le degré d'interopérabilité résultant de notre évaluation ne satisfait pas l'objectif assigné par l'exigence, notre approche fait aussi émerger une spécification d'une telle stratégie, concernant le paramétrage et la personnalisation des composants permettant alors de satisfaire l'objectif initial.

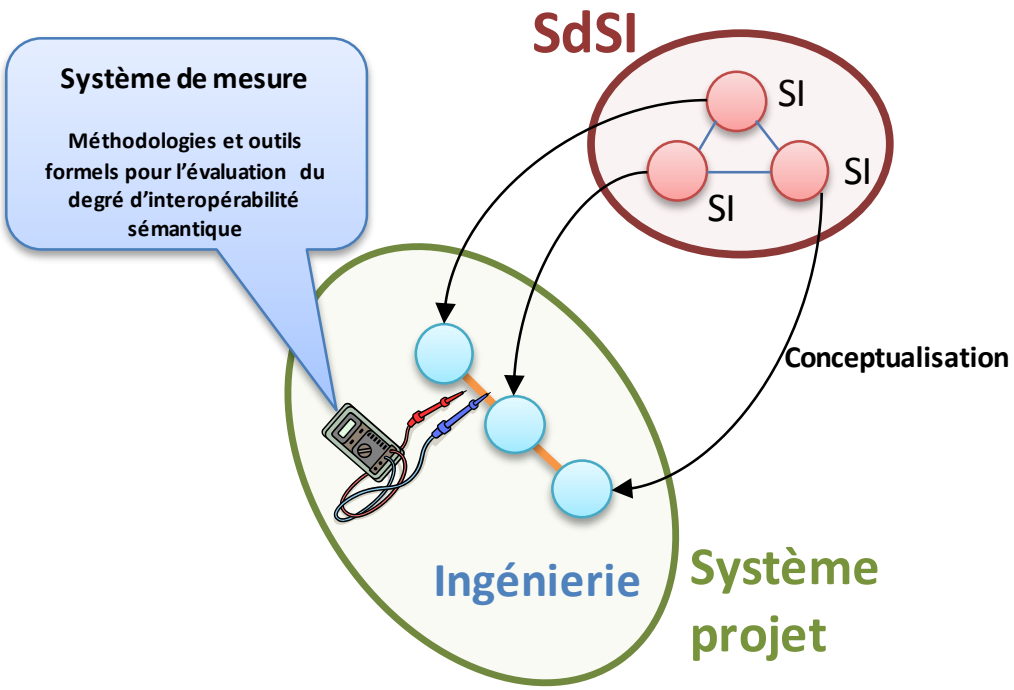


Figure 1. Objectif et contribution de recherche

Nous avons adopté la méthodologie de recherche proposée par (Peffers, Tuunanen et Rothenberger 2007) pour illustrer la méthodologie adoptée par cette thèse (voir Figure 2).

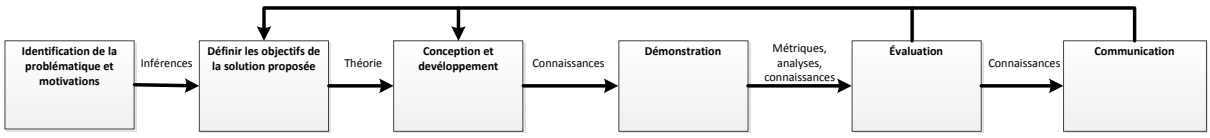


Figure 2. Méthodologie de recherche proposée par (Peffers, Tuunanen et Rothenberger 2007)

Cette méthodologie peut être appliquée à nos travaux de recherche. Son instanciation est décrite dans la Figure 3 à travers les quatre chapitres dont la structure est détaillée au niveau de la Figure 4.

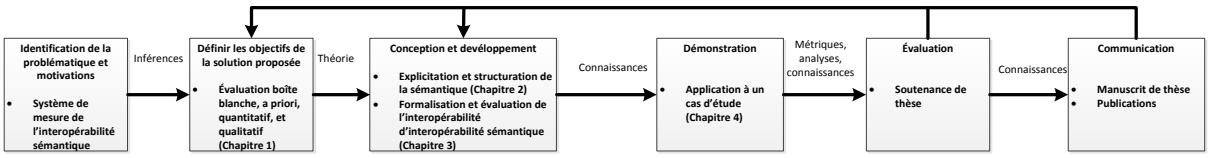


Figure 3. Instanciation de la méthodologie de recherche proposée par (Peffers, Tuunanen et Rothenberger 2007)

2. Hypothèses de travail

Le système de mesure que nous proposons pour évaluer le degré d'interopérabilité sémantique entre plusieurs systèmes d'information analyse les modèles conceptuels associés à chaque SI. Pour assurer la pertinence des métriques proposées, nous postulons dans la suite du mémoire que les hypothèses suivantes sont vérifiées :

(H1). Les modèles conceptuels utilisés à l'entrée du processus d'évaluation formalisent la sémantique métier complète des systèmes d'information étudiés.

(H2). La sémantique des systèmes d'information étudiés, dépendante de la connaissance métier de ces systèmes, est garantie par des experts du domaine dont nous ne remettons pas en cause les conclusions.

3. Structure du mémoire de thèse

Le manuscrit de thèse est composé de quatre chapitres dont la structure logique est présentée sur la Figure 4 conformément à la méthodologie de recherche proposée par (Peffers, Tuunanen et Rothenberger 2007):

Le premier chapitre a pour objectif d'introduire le contexte global de nos travaux de thèse, relatif à l'environnement dans lequel évoluent les systèmes d'entreprises collaboratives, en faisant émerger divers constats liés à la non-interopérabilité. Ces constats nous permettent

de justifier le besoin d'évaluation de cette non-interopérabilité. Différentes approches d'évaluation de l'interopérabilité sont ensuite détaillées au travers d'un état de l'art mettant en évidence les caractéristiques de chacune d'entre elles. Nous concluons ce chapitre par la mise en évidence des verrous scientifiques liés à l'évaluation de l'interopérabilité sémantique des systèmes d'information, justifiant ainsi notre proposition d'un système de mesure.

Dans le **second chapitre**, nous identifions les défis associés à l'extraction de la sémantique métier dans les modèles conceptuels des systèmes d'information. L'approche de « normation » des modèles conceptuels statiques de SI, que nous adoptons, est basée sur l'approche « fact-oriented modelling », et permet la définition d'une représentation détaillée de tous les concepts présents dans ces modèles. Nous proposons ensuite une méthode pour extraire automatiquement la structure sémantique de ces modèles (sous forme d'agrégats), facilitant ainsi la compréhension de la connaissance incorporée dans le cœur des modèles d'entreprise sous-jacents. L'approche adoptée commence par identifier les concepts obligatoires « cœur de métier » puis fait émerger ce que nous appelons des blocs sémantiques. Cet outillage définit un corpus scientifique qui nous permet, dans le chapitre suivant, de spécifier notre système de mesure.

Nous proposons, dans le **troisième chapitre,** une approche de formalisation des relations sémantiques (R_c, R_{SB}) et des métriques pour évaluer l'interopérabilité. Elle consiste, à partir du modèle conceptuel obtenu dans le second chapitre, à détecter et évaluer la perte sémantique, puis à qualifier les effets de cette perte sémantique sur l'interopération. Nous proposons ainsi des métriques pour évaluer l'interopérabilité sémantique potentielle et effective formalisée par un couple de métriques dénoté (ν, ε). L'analyse de ces métriques et des corrélations possibles entre ces métriques, à travers une représentation graphique des mesures d'interopérabilité sémantique, permet de spécifier le paramétrage et la personnalisation des systèmes d'information étudiés pour atteindre un degré d'interopérabilité maximal.

Afin de valider notre approche sur un cas d'application de dimension réelle, nous avons prototypé, dans le **quatrième chapitre,** les outils présentés dans les chapitres 2 et 3, permettant une automatisation partielle de notre approche. Ces outils sont mis en œuvre dans le cadre d'une interopération B2M (Business to Manufacturing) entre deux systèmes d'information intra entreprise. Cette application met en présence l'ERP Sage X3 qui doit interopérer avec le MES Flexnet Apriso pour assurer la fabrication d'une famille de produits au sein de l'Atelier Inter-établissements de Productique Lorrain. Différents scénarios sont présentés afin d'illustrer les apports d'une cartographie des mesures d'interopérabilité

sémantique pour la spécification du paramétrage ou de la personnalisation des deux systèmes d'information étudiés.

Une **conclusion** résume les apports de notre thèse au domaine de l'interopérabilité des systèmes d'entreprise, et plus particulièrement l'interopérabilité sémantique, contribuant ainsi à la communauté de recherche internationale s'intéressant aux fondements scientifique de l'interopérabilité d'entreprise. Nous terminerons ce mémoire en analysant les **limites** de notre approche et en proposant quelques **perspectives** de recherche.

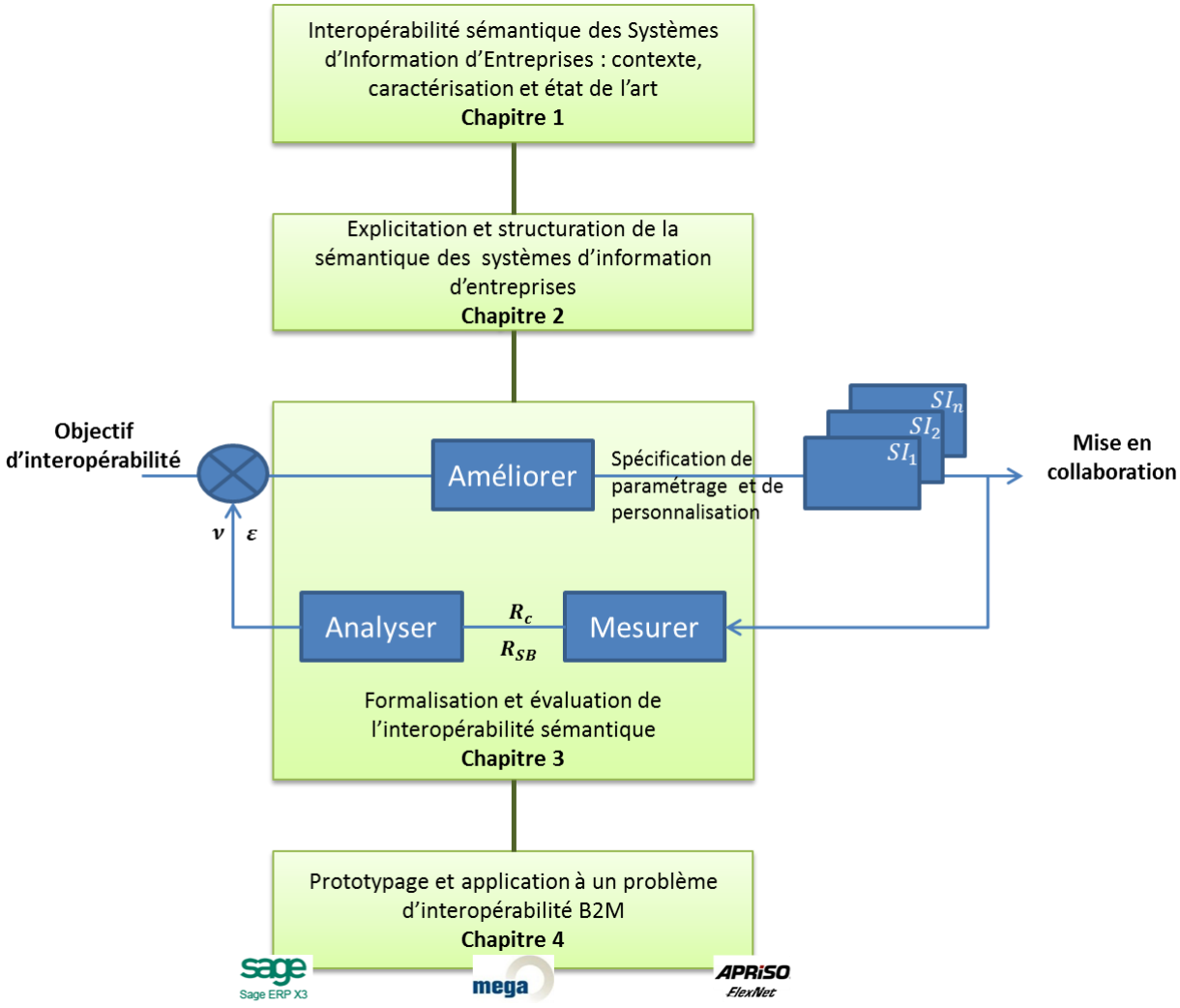


Figure 4. Structure du manuscrit de thèse

Chapitre 1 : Interopérabilité sémantique des Systèmes d'Information d'Entreprises : contexte, caractérisation et état de l'art

Introduction

La complexité accrue de l'environnement dans lequel évoluent les entreprises, caractérisé par des changements rapides, a fait émerger différents défis auxquels toute entreprise doit faire face pour assurer sa compétitivité. Cela amène l'entreprise à collaborer avec d'autres entreprises, pour réaliser des objectifs communs dans le cadre de réseaux d'entreprises ou d'entreprises étendues (Bititci, et al. 2004).

L'interopérabilité d'entreprise (et plus spécifiquement l'interopérabilité des systèmes d'information d'entreprises) est désormais considérée comme un enjeu majeur pour favoriser l'activité collaborative de création de valeur, et pour assurer une performance attendue dans le cadre d'un réseau d'entreprises.

En effet, plusieurs entreprises, qu'elles soient de services, manufacturières ou gouvernementales, doivent supporter des coûts non négligeables liés à la non-interopérabilité, qui se répercutent négativement sur la performance globale de l'entreprise et/ou du réseau d'entreprises.

Dans ce contexte, évaluer et améliorer sa propre capacité à interopérer est désormais un levier essentiel pour toute entreprise visant l'amélioration de son potentiel ainsi que sa performance globale.

En ce sens, ce chapitre a pour objectif, dans un premier temps, d'introduire le contexte global où évoluent les entreprises. Ce contexte fait émerger divers constats liés à la non-interopérabilité. Dans un deuxième temps, les différentes approches d'évaluation de l'interopérabilité sont présentées au travers d'un état de l'art mettant en évidence les caractéristiques de chacune d'elles.

1. Systèmes d'information d'entreprises collaboratives

Face à l'évolution des caractéristiques du marché et de leur environnement, le challenge pour les entreprises est de collaborer, avec pour objectif de faire en sorte que leurs produits et/ou services se vendent au mieux. (Thoben et Jagdev 2001) signale que les motivations pour mettre en place un réseau d'entreprises collaboratives sont pour la plupart des motivations à court terme visant l'optimisation des coûts, des délais et de la qualité. En conséquence, la valeur ajoutée d'une collaboration doit être mesurable pour pouvoir évaluer son intérêt pour une entreprise donnée.

1.1. Typologie des collaborations inter-entreprises

Bien que chacun ait une notion intuitive de ce que la collaboration signifie, ce concept est souvent confondu avec celui de la coopération. Souvent, ces deux termes sont utilisés pour désigner la même chose. L'ambiguïté atteint un niveau plus élevé lorsque l'on considère d'autres termes proches comme la mise en réseau (Networking), la communication et la coordination (Himmelman 2001) et (Denise 1999). Bien que chacun de ces concepts soit un prérequis important pour la collaboration, ils ne lui sont pas équivalents. Pour clarifier ces diverses notions, nous reprenons les définitions suivantes issues de (Camarinha-Matos et Afsarmanesh 2008) et synthétisées sur la Figure 5:

1. Networking : implique la communication et l'échange d'informations pour réaliser un avantage commun.
2. Coordination : en plus du networking, elle implique l'alignement et la synchronisation des activités mises en commun pour rendre plus efficaces les résultats attendus.
3. Coopération : elle implique non seulement la coordination, mais aussi le partage des ressources pour réaliser des objectifs compatibles. La coopération est réalisée à travers la répartition des tâches à réaliser entre les participants.
4. Collaboration : c'est un processus dans lequel les entités partagent des informations, des ressources et des responsabilités pour planifier conjointement, mettre en œuvre et évaluer un programme d'activités leur permettant de réaliser les missions communes. La collaboration implique l'engagement mutuel des participants pour résoudre ensemble un problème. Ceci implique une confiance mutuelle.

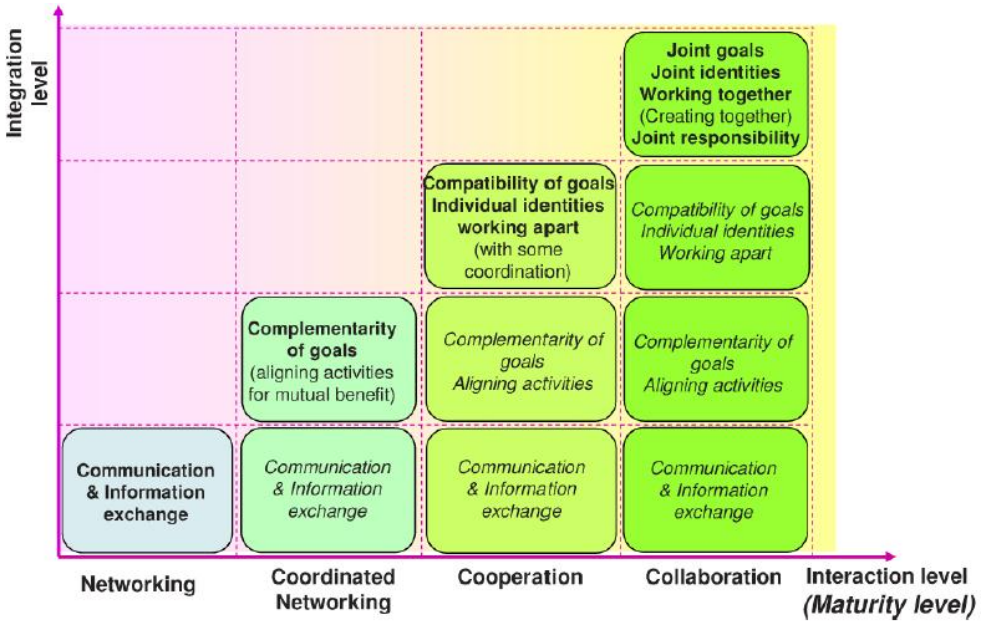


Figure 5. Stratégies mises en place par les entreprises en réseau (Camarinha-Matos et Afsarmanesh 2008)

Un réseau d'entreprises collaboratives met en place une série de relations bilatérales telles que des accords non contractuels, des accords contractuels, des joint-ventures[3] (Jagdev et Thoben 2001). Ces relations permettent de spécifier différentes typologies de réseau d'entreprises en termes de chaîne logistique (supply chain en anglais), d'entreprise étendue ou d'entreprise virtuelle (voir la Figure 6).

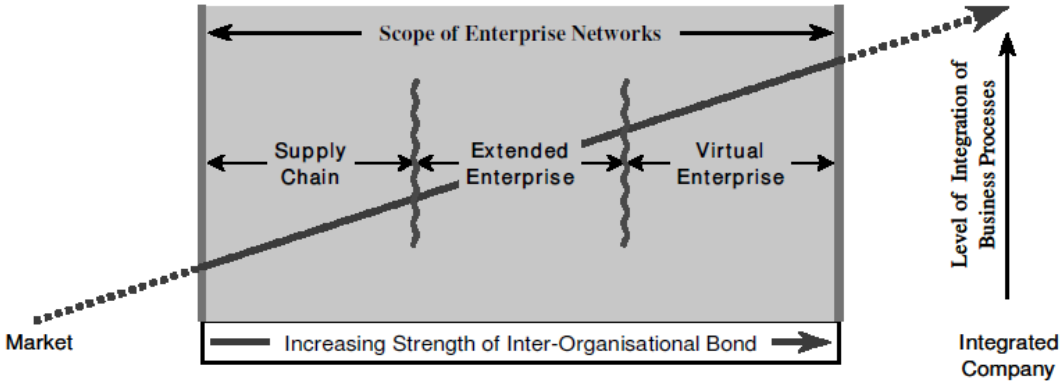


Figure 6. Les typologies de réseau d'entreprises (Jagdev et Thoben 2001)

Ces typologies de réseau d'entreprises sont définies comme suit (voir Figure 7) :

1. La Supply Chain (SC) ou la chaîne logistique est un réseau stable d'entreprises ayant chacune des rôles bien spécifiés dans la chaîne de valeur industrielle, couvrant les étapes allant de la conception des produits jusqu'à la livraison des produits finis chez les clients en passant par l'obtention de la matière première, la production, l'expédition, la distribution et l'entreposage.
2. Une entreprise étendue (Supply Chain étendue) est un ensemble d'entreprises et d'acteurs économiques associés pour la réalisation de projets communs. Ce type d'association s'est fortement développé suite à la mondialisation et au développement des technologies de l'information, et fonctionne principalement sur la base d'alliances et de partenariats. Elle correspond bien à l'économie de la connaissance, qui demande la mise en commun de connaissances et de compétences et utilise les capacités distribuées de chacun de ses membres pour gagner un avantage compétitif (Kochhar et Zhang 2002).

[3] Le terme joint-venture est l'expression en anglais désignant un projet déterminé commun pour lequel plusieurs entreprises se sont groupées. Il s'agit généralement d'une alliance technologique et industrielle pour mettre en commun l'expertise des partenaires de la joint-venture pour la réalisation d'un projet industriel ou de projets d'infrastructures, l'équivalent français de "joint-venture" est la co-entreprise. (Source Lexinter)

3. Finalement, l'entreprise virtuelle (Supply Chain Collaborative) est une alliance temporaire entre des entreprises qui rassemblent leurs compétences complémentaires pour réaliser une tâche particulière, pendant une période de temps donnée (Kochhar et Zhang 2002).

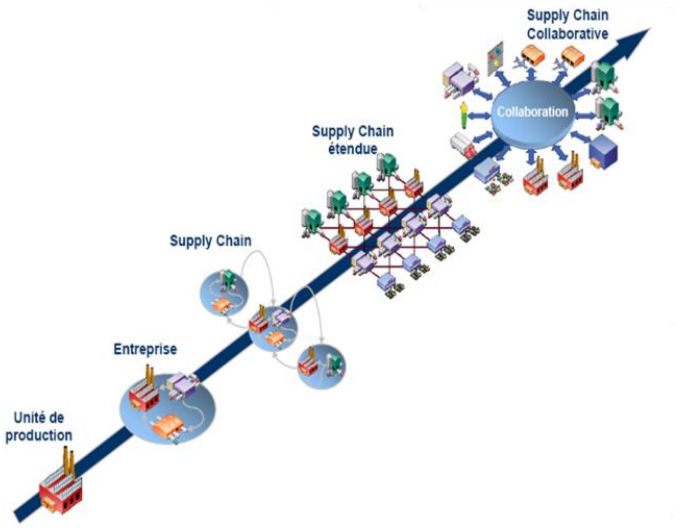


Figure 7.Tendance à la mise en œuvre d'une chaîne logistique (source CSC®)

Que ce soit une entreprise étendue, une SC, ou une entreprise virtuelle, le but de la collaboration est de réaliser un maximum de bénéfices.

1.2. Les Systèmes d'Information pour la mise en œuvre des collaborations inter-entreprises

Pour rendre la collaboration possible, il est important que les entreprises aient intégré les Technologies de l'Information et de la Communication (TIC) et les outils supportant la prise de décision. D'ailleurs, la coordination des opérations au niveau technique est au cœur de la notion de collaboration. Les TIC sont ainsi indispensables pour assurer la fluidité des échanges d'information.

Il en découle que les Systèmes d'Information (SI) jouent un rôle majeur dans la chaîne de création de la valeur des entreprises collaboratives (voir Figure 8).

Pour réaliser un objectif commun, les Systèmes d'Information d'Entreprise en réseau collaborent et développent différentes interactions. Dans ce cadre, ces systèmes sont complètement **distribués** au niveau de l'ensemble du réseau des entreprises. Ils sont **autonomes** en regard de leur propre mission. Ils sont **hétérogènes** de par leur architecture, le contenu des fonctions qu'ils assurent, leur conception (modèles, architectures...), leur langage de modélisation ainsi que leurs fonctionnalités.

L'information est ainsi complètement distribuée tout au long de la chaine de valeur et utilisée par plusieurs applications. Ceci implique que l'échange des flux informationnels devient de plus en plus complexes (quantité, diversité, hétérogénéité) et peut engendrer des problèmes d'interopérabilité.

Les entreprises doivent s'assurer du niveau d'échange d'informations et précisément de la quantité, la qualité et la fréquence des informations échangées. Ceci met en évidence des questions concernant la mesure de performance de l'interopérabilité des Systèmes d'Informations ainsi que l'identification de métriques quantifiables.

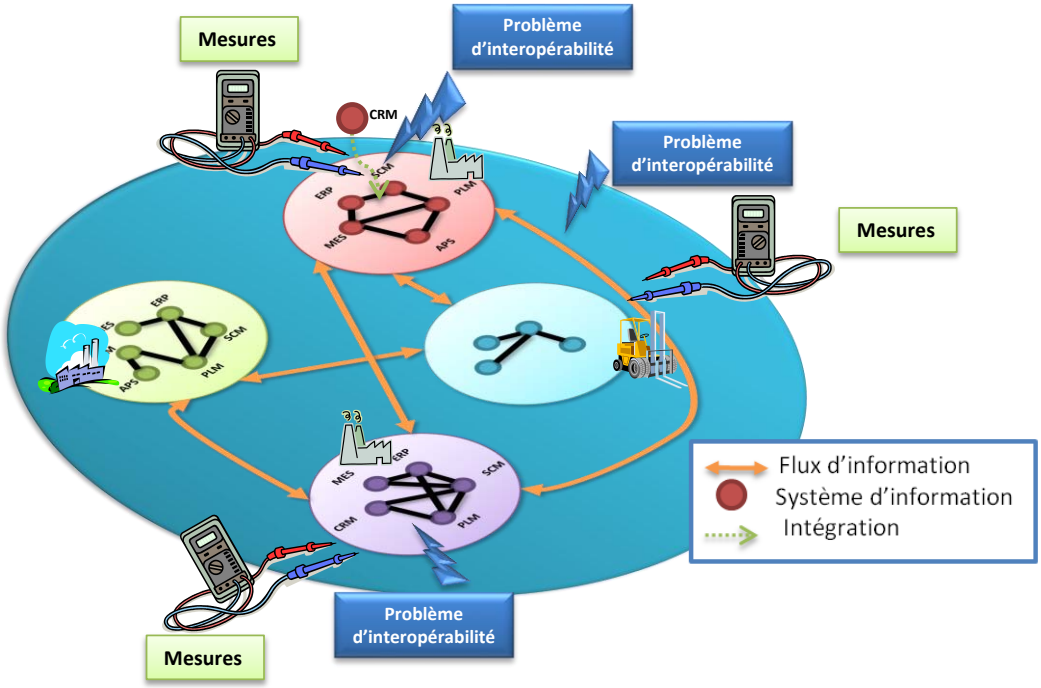


Figure 8. Systèmes d'entreprises collaboratives avec les différents points de mesures

2. Interopérabilité des Systèmes d'Informations

2.1. Définitions et types d'interopérabilité

Dans la littérature, il existe diverses définitions pour l'interopérabilité. Dans ce mémoire de thèse, nous considérons, dans un premier temps, la définition de (IEEE 1990) qui définit l'interopérabilité comme *la capacité de deux systèmes ou plus à échanger de l'information et*

à l'utiliser[4]. (Carney, Fisher et Place 2005) étendent cette définition en ajoutant la notion d'objectif lié à l'interopération ainsi que la notion de contexte qui définit l'environnement dans lequel évolue l'ensemble des informations échangées. Finalement, nous adoptons la définition de (Carney, Fisher et Place 2005) qui définissent l'interopérabilité comme *la capacité d'un ensemble d'entités communicantes à* (i) *échanger de l'information spécifique et* (ii) *à opérer à partir de cette information, selon une sémantique commune,* (iii) *dans le but d'accomplir une mission spécifiée dans un contexte donné.*[5]

Il existe plusieurs types d'interopérabilité ; les principaux sont décrits par (EIF 2004), (COM 2006) et (EIF 2010) :

- ***L'interopérabilité technique*** désigne le recours à la définition et l'utilisation d'interfaces technologiques, des normes et protocoles, en vue de créer des systèmes d'information collaboratifs fiables, efficaces et performants capables d'échanger l'information.
- ***L'interopérabilité sémantique*** consiste à faire en sorte que la signification des informations échangées c'est-à-dire leur sémantique ne soit pas perdue dans la procédure d'interopération et qu'elle soit préservée et comprise par les personnes, les applications et les institutions concernées (les formats des messages, la structuration, le sémantique des constituants). Elle nécessite que l'interopérabilité technique soit effective.
- ***L'interopérabilité organisationnelle*** est la capacité d'identifier les acteurs et les procédures organisationnelles intervenant dans la fourniture d'un service spécifique et de parvenir à un accord entre ces acteurs et à des procédures sur la manière de structurer leur interaction. En d'autres termes, il s'agit de définir les «interfaces d'entreprise» et s'intéresser aux rôles des entités et des acteurs en interaction avec les systèmes d'information. Elle nécessite que l'interopérabilité sémantique soit effective.

L'essence de l'**interopération** réside dans les relations d'interopérabilité entre les systèmes évoluant dans le contexte coopératif (Carney, Fisher et Place 2005) et nécessite certaines exigences pour garantir cette interopération. (EIF 2004) et (EIF 2010) résument ces besoins :

- La Coopération des systèmes d'informations dans le but d'assurer l'objectif attendu;
- L'échange d'informations entre les systèmes d'informations;

[4] « The ability of two or more systems or elements to exchange information and to use the information that has been exchanged». (IEEE 1990)

[5] « the ability of a collection of communicating entities to share specified information and operate on that information according to a shared operational semantics in order to achieve a specified purpose in a given context». (Carney, Fisher et Place 2005)

- Le partage et la réutilisation d'informations entre les systèmes d'informations

Les travaux de (Mallek, Daclin et Chapurlat 2010) reprennent les besoins d'interopérabilité entre les différents systèmes collaboratifs pour établir un référentiel d'exigences d'interopérabilité défini par les trois exigences suivantes :

- ***L'exigence d'interopération*** *est définie par : « un énoncé qui prescrit une fonction, une aptitude ou une caractéristique, dépendant du temps et lié à la performance de l'interaction, que les entreprises doivent satisfaire lors de la collaboration ».*
- ***L'exigence de compatibilité*** *est définie par : « un énoncé qui prescrit une fonction, une aptitude ou une caractéristique, indépendant du temps et lié aux barrières d'interopérabilité pour chaque niveau d'interopérabilité, que les entreprises doivent satisfaire avant toute collaboration ».*

  La compatibilité est souvent vue comme la capacité de deux composants ou plus d'exécuter leurs fonctions en partageant un environnement commun.

  Selon (Panetto 2007), les systèmes interopérants sont, par définition, nécessairement compatibles, l'inverse n'est pas forcément vrai. Ainsi, pour réaliser un échange robuste d'informations, il faut aller au-delà de la compatibilité.
- ***L'exigence de réversibilité*** *est définie par : « un énoncé qui prescrit une fonction, une aptitude ou une caractéristique, dépendant du temps et lié à la capacité qu'a l'entreprise à reprendre son autonomie et à retourner à son état d'origine (en terme de ses propres performance), que l'entreprise doit satisfaire à la fin de la collaboration ».*

Nous adhérons à l'ensemble des définitions données ci-dessus et nous nous contentons dans la suite de ce manuscrit de considérer principalement l'étude des exigences d'interopération et de compatibilité. L'exigence de réversibilité, étant en relation avec le cadre provisoire et non pérenne dans le temps du cadre de collaboration, ne fera pas l'objet de notre étude puisque nous nous plaçons dans le contexte de réalisation de la collaboration.

2.2. Les barrières à l'interopérabilité

Pour assurer l'interopération entre les différents systèmes d'informations, plusieurs points de vue doivent être considérés pour surmonter les barrières au niveau technique, sémantique et organisationnel ((EIF 2004), (Chen, Dassisti, et al. 2006)). Ces barrières à l'interopérabilité ont été identifiées par (Daclin et Chapurlat 2008) comme suit :

- *Les problèmes d'ordre technologique sont relatifs à l'incompatibilité des technologies de l'information (plateformes et applications informatiques). Ces problèmes*

concernent les normes pour présenter, stocker, échanger, traiter et communiquer les données via les moyens informatiques.

- *Les problèmes de type conceptuel concernent la syntaxe et la sémantique des informations qui sont échangées. Ces problèmes concernent la modélisation des informations à un haut niveau d'abstraction comme par exemple un modèle d'entreprise, ainsi que la façon de structurer les informations en vue d'un échange.*
- *Les problèmes d'ordre organisationnel sont liés à la définition de la responsabilité et d'autorité qui induisent ou impactent la qualité des conditions de travail. Ce sont donc essentiellement les facteurs humains et les comportements organisationnels qui peuvent être incompatibles avec l'interopérabilité.*

La résolution des barrières d'ordre technologique est désormais facilitée et partiellement atteinte par les interfaces techniques et les standards mis en place. Nous pouvons citer, par exemple, XML[6] (eXtensible Mark-up Language) et les applications qui lui sont attachées : SOAP[7] (Simple Object Access Protocol), WSDL[8] (Web Services Description Language), ebXML[9] (Electronic Business XML Initiative) ainsi que les diverses initiatives de standardisation ((ISO 14528 1999), (IEC 62264-1 2002), (ISO EN DIS 19440 2004)).

Les barrières organisationnelles restent de nos jours une difficulté majeure qui pose le problème de l'accès au niveau d'interopérabilité désiré. Des travaux menés dans le cadre du Comité Technique 3S-AI (Systèmes de Systèmes et Services - Architecture et Ingénierie) de l'AFIS[10] tentent de pallier à ces difficultés.

Finalement, l'interopérabilité sémantique, dans la mesure où elle traite de la signification des informations échangées, représente une piste de recherche intéressante qui reste très ouverte aujourd'hui. Dans ce mémoire de thèse, nous nous focalisons donc principalement sur l'étude de **l'interopérabilité sémantique** des systèmes d'information d'entreprises.

Dans ce contexte, plusieurs initiatives ont été menées par diverses organisations pour contribuer à la problématique d'interopérabilité sémantique. Nous pouvons citer notamment :

- US Government : Healthcare Information Technology Enterprise Integration. Le but est d'augmenter l'efficience et la productivité des SI dans le domaine de la santé (Stroetmann, Rodrigues et Stroetmann 2006)**.**

[6] http://www.w3.org/standards/xml/
[7] http://www.w3.org/standards/techs/soap
[8] http://www.w3.org/standards/techs/wsdl#w3c_all
[9] http://www.oasis-open.org/committees/download.php/24618/ebms_core-3.0-spec-cs-02.pdf
[10] AFIS - Association Française d'Ingénierie Système, http://www.afis.fr/default.aspx

- Commission Européenne : initiatives eEurope 2005 et i2010. Le but est d'assurer l'interopérabilité des e-services gouvernementaux: IDABC[11] (Interoperable Delivery of pan-European eGovernment Services to public Administrations, Business and Citizens)

2.3. Coûts relatifs à la non-interopérabilité et à l'interopérabilité partielle

2.3.1. Constats

Les différentes barrières à l'interopération peuvent empêcher une interopération totale et, à terme, engendrer des coûts liés à cette non-interopérabilité ou à une interopérabilité partielle. Nous considérons, dans cette section, deux études importantes pour évaluer les coûts au niveau de deux secteurs industriels aux États-Unis :

i. La chaîne logistique de l'industrie automobile.
ii. L'industrie du bâtiment (Facilities Industry, en anglais)

Selon l'étude de (Tassey, Brunnermeier et Martin 1999) élaborée par le RTI[12] pour le compte de l'Institut National des Standards et Technologies (en anglais : National Institute of Standards and Technology NIST[13]), les coûts d'une interopérabilité partielle au niveau de la chaîne logistique de l'industrie automobile américaine ont été estimés à un milliard de dollars par an.

Par ailleurs, le NIST a mené, conjointement avec le Ministère du Commerce américain et l'Administration Technologique, une étude présentée dans (Gallaher, et al. 2004) pour évaluer les pertes d'efficacité dans l'industrie du bâtiment américaine résultant de l'interopérabilité partielle ou d'une non-interopérabilité. Ce type d'industrie englobe le design, la conception, la construction et la maintenance des bâtiments commerciaux, institutionnels et industriels, des grandes installations et des usines. Ainsi, cette industrie a besoin de faire interopérer les différentes parties prenantes via leurs chaines logistiques comme les architectes, les ingénieurs, les entrepreneurs généraux, les fournisseurs et les propriétaires ainsi que les opérateurs. (U.S. Census Bureau 2004) estime que l'industrie du bâtiment aux États-Unis, en 2002, représente 374 milliards de dollars. Selon l'étude de (Gallaher, et al. 2004), les coûts dus à la non-interopérabilité s'élèvent à 15.8 milliards de dollars par an (en 2002) et représentent entre 1 et 2 % du revenu de l'industrie du bâtiment.

[11] http://europa.eu/legislation_summaries/information_society/l24147b_fr.htm
[12] http://www.rti.org/
[13] http://www.nist.gov/index.html

Cependant, cela ne représente probablement qu'une partie du coût total dû à une interopérabilité partielle. Ainsi, l'identification des pertes et la proposition d'améliorations représentent potentiellement des gains économiques significatifs.

Les coûts identifiés dans ces deux études sont répartis en différentes catégories :

- Les coûts d'évitement (Avoidance cost) pour empêcher les problèmes d'interopérabilité techniques avant qu'ils ne se produisent. Ces coûts englobent les coûts d'achat des applications d'entreprise pour faciliter l'échange, les coûts de maintenance et de formation du personnel pour ces outils, les coûts d'implémentation de standards tels que STEP[14].
- Les coûts d'atténuation (Mitigating cost) représentent les coûts des ressources exigées pour adresser les problèmes d'interopérabilité après qu'ils se soient produits. Ils englobent principalement le coût de réingénierie des modèles et des prototypes incorrects et le coût de saisie manuelle des données quand les méthodes d'échange de données sont indisponibles ou insatisfaisantes.
- Les coûts de retard (Delay cost) résultent des problèmes d'interopérabilité qui retardent l'introduction d'un nouveau produit. Ces coûts incluent la perte du profit due à la baisse dans les parts de marché causée par les retards.

2.3.2. Exemple des coûts d'évitement

L'interopérabilité des systèmes d'information d'entreprises est un domaine d'intérêt en croissance, à cause du besoin continu d'intégration de nouveaux systèmes et des systèmes en évolution, en particulier dans le contexte des réseaux d'entreprises collaboratives. En effet, les applications d'entreprise et les logiciels doivent être interopérables pour réaliser une activité sans interruption malgré les barrières techniques, conceptuelles et organisationnelles.

Le fait que la part du marché d'acquisition des logiciels assurant l'Intégration des Applications d'Entreprise (IAE) a enregistré une hausse considérable depuis 1999 représente une indication claire des besoins accrus en applications pour pallier aux problèmes émergents d'interopérabilité (voir Figure 9).

[14] The Standard for the Exchange of Product Model Data (ISO 10303). Ce standard permet la représentation et l'échange des données de modèles de produit en couvrant leur cycle de vie.

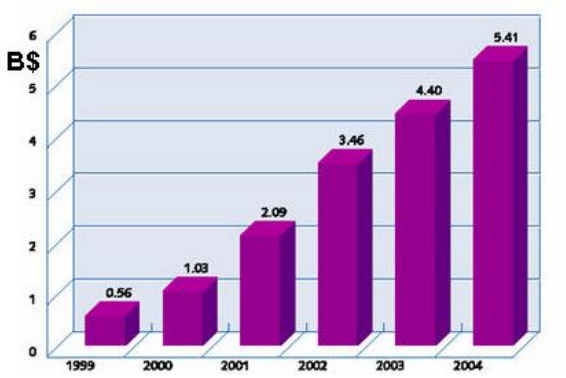


Figure 9. Les revenus des licences des logiciels assurant l'Intégration des Applications d'Entreprise. Source Yankee Group 2001

Malgré les efforts dispensés pour surmonter les barrières à l'interopérabilité dans l'industrie, la non-interopérabilité peut être la source de coûts non négligeables pour toutes les entreprises associées. Les études menées par le Yankee Group[15] en 2001 montrent que plus de 40 % du budget lié à l'implémentation des Technologies d'Information (TIC) est consacré majoritairement à la recherche des solutions pour les problèmes d'intégration incluant des problèmes d'interopérabilité (voir Figure 10).

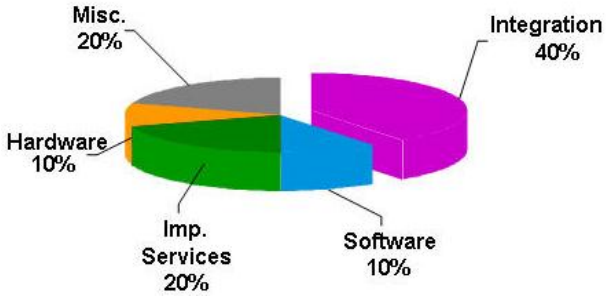


Figure 10. Le budget d'implémentation des systèmes

2.4. Effets d'une interopérabilité partielle ou d'une non-interopérabilité

L'étude des divers coûts engendrés par une interopérabilité partielle ou d'une non-interopérabilité (section 2.3) montrent que ces coûts représentent une part non négligeable des coûts totaux pour la réalisation des produits et/ou des services. Ces coûts englobent les coûts des investissements en TIC (coûts d'évitement) et les coûts induits par les ressources et les temps de mise en place pour pallier aux barrières à l'interopération (coûts

[15] http://www.yankeegroup.com/home.do

d'atténuation) ainsi qu'aux pertes induites par le retard de la mise sur le marché des produits et/ou des services.

La non-interopérabilité influe négativement sur la performance globale des entreprises collaboratives en réseau, engendrant des pertes probables de parts de marché et un besoin grandissant pour maitriser les pertes liées à cette non-interopérabilité. La maitrise de ces pertes doit passer, à notre sens, par une évaluation *a priori* de l'interopérabilité pour pouvoir estimer l'effort et les améliorations à mettre en œuvre pour surmonter ces pertes.

3. Évaluation de l'interopérabilité des systèmes d'information d'entreprises

3.1. Que signifie évaluer l'interopérabilité ?

Pour garantir leur amélioration continue, les entreprises sont amenées à évaluer leurs performances clés. L'évaluation de ces performances est généralement caractérisée par des indicateurs de performance, définis par (Ducq 2007) comme suit :

Un Indicateur de Performance est une donnée quantifiée, qui mesure l'efficacité des variables de décision par rapport à l'atteinte de l'objectif défini au niveau de décision considéré, dans le cadre des objectifs globaux de l'entreprise.

Une mesure permet ainsi de :

- **Caractériser**, pour faciliter la compréhension des processus, produits, des ressources et des environnements des entreprises.
- **Évaluer**, pour déterminer le statut actuel des entreprises.
- **Prédire** une ou plusieurs caractéristiques (qualité,..) finales des systèmes étudiés à travers l'analyse des différentes relations entre les différents processus et produits.
- **Améliorer**, en identifiant les barrières, les causes d'inefficacité et en déterminant les actions à entreprendre pour l'amélioration.

« Mesurer » est ainsi associé à un processus de collection de données permettant de générer des mesures ou métriques. D'après (Monperrus 2008), il existe une distinction entre ces deux notions :

1. **Une métrique** *est un homomorphisme du monde empirique vers le monde des nombres. En tant qu'homomorphisme, une métrique préserve les relations empiriques (inspirée de (Zuse 1991), p.16).*
2. **Une mesure** *est une suite d'actions effectuée afin d'assigner un nombre aux attributs des entités du monde empirique (inspirée de (Fenton et Pfleeger 1991), p.5).*

Dans ce mémoire de thèse, nous nous intéressons à l'étude de l'interopérabilité considérée comme une exigence de performance clé des entreprises collaboratives. Ainsi, définir des métriques pour l'interopérabilité, doit permettre à terme de mesurer le degré

d'interopérabilité. On peut distinguer trois types d'évaluation liés à la typologie de l'interopérabilité identifiée dans la section 2:

- **Évaluation technique**, elle concerne l'analyse de la compatibilité de deux ou plusieurs systèmes, aptes à communiquer et échanger des données brutes sous la forme de flots de données.
- **Évaluation sémantique**, elle concerne l'analyse de la capacité de deux ou plusieurs systèmes, à interpréter, selon une sémantique partagée, des données échangées pour en extraire de l'information pertinente pour leurs processus. Ce type d'évaluation est au cœur de ce mémoire de thèse.
- **Évaluation organisationnelle**, elle concerne l'analyse de la capacité de deux ou plusieurs systèmes ou organisations à collaborer en tenant compte des problèmes liés aux pratiques de l'entreprise (Ducq 2007). Elle met l'accent sur l'analyse des forces et des faiblesses d'une organisation du point de vue de sa performance (Lusthaus, et al. 2003).

3.2. État de l'art sur l'évaluation de l'interopérabilité

Durant ces dernières années, beaucoup de chercheurs se sont intéressés à l'évaluation de l'interopérabilité.

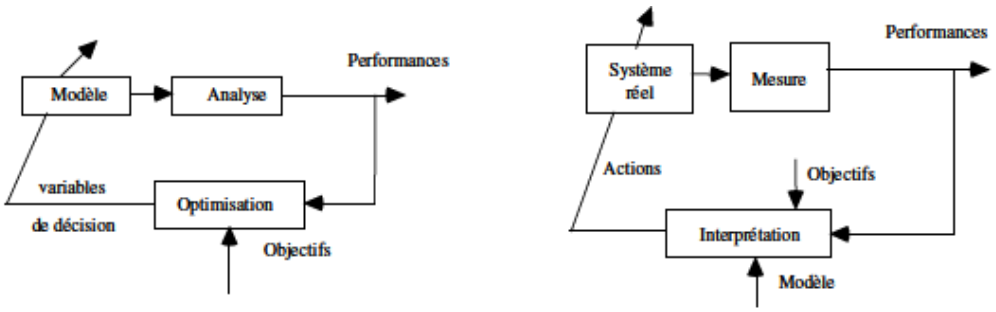
Dans la littérature, les travaux de recherche se sont principalement focalisés sur l'évaluation de différentes typologies d'interopérabilité des systèmes, durant les différentes phases du cycle de vie de ces systèmes. Ces travaux ont fait émerger diverses approches ayant différentes caractéristiques (qualitatives, quantitatives, empiriques, formelles….).

Dans cette section, nous présentons un état de l'art des approches existantes sur l'évaluation de l'interopérabilité, en définissant leurs caractéristiques selon qu'elles portent sur :

- Une évaluation *a priori* ou *a posteriori*
- Une évaluation quantitative ou qualitative
- Une évaluation propre au système étudié ou relativement à d'autres systèmes
- Une évaluation de systèmes vus comme des boîtes blanches, boîtes noires

Pour réaliser notre étude, nous proposons de classer, les approches selon leur occurrence *a priori* ou *a posteriori* de la phase de conception du Système de Systèmes d'Information collaboratifs. En adaptant une définition de la mesure de performance proposée par (Ducq 2007) (l'interopérabilité étant vue comme une performance particulière d'une entreprise),

nous pouvons distinguer l'évaluation *a priori* de l'interopérabilité et l'évaluation *a posteriori* de l'interopération de systèmes collaboratifs. La Figure 11 différencie entre les deux topologies d'évaluation. En effet, l'évaluation *a priori* concerne l'évaluation du modèle du système à travers l'analyse de ses caractéristiques pour vérifier ses performances et permettre une éventuelle amélioration et optimisation pour répondre aux exigences de performances requises. Par ailleurs, l'évaluation *a posteriori* s'effectue sur le système réel existant pour permettre la mesure de ses performances et de définir les actions nécessaires pour répondre aux exigences de ce système.



(a) Evaluation de l'interopérabilité *a priori*

(b) Evaluation de l'interopération *a posteriori*

Figure 11. Dualité interopérabilité / interopération (Figure adaptée de (Ducq 2007))

3.2.1. Évaluation de l'interopérabilité *a priori* pendant la phase de conception du Système de Systèmes d'information collaboratifs

Évaluer l'interopérabilité *a priori* consiste à analyser la capacité des systèmes d'information d'entreprises à interopérer avant leur mise en réseau pour permettre leur collaboration. Cette évaluation repose sur la mesure de diverses caractéristiques de l'interopérabilité sur la base de modèles.

3.2.1.1. Mesure du potentiel d'interopérabilité : approche de (Daclin, Chen et Vallespir 2006) et (Chen, Vallespir et Daclin 2008)

Selon (Daclin, Chen et Vallespir 2006) et (Chen, Vallespir et Daclin 2008), le potentiel d'interopérabilité d'un système est évalué à travers un ensemble de propriétés propres au système qui peuvent impacter l'interopérabilité telles que l'utilisation des standards, la flexibilité et l'ouverture de l'organisation, l'existence des modèles d'entreprise. Ces propriétés peuvent être évaluées dès la phase de la conception du système sans une connaissance préalable des partenaires du réseau collaboratif.

La Figure 12 donne un exemple de l'évaluation du potentiel d'interopérabilité à partir de l'identification de propriétés propres au système devant interopérer – par exemple s'il est totalement ouvert (+1 point), configurable (+1 point), centralisé (+0 point), etc. Cette évaluation permet d'identifier le risque de rencontrer des problèmes pendant la mise en place d'un partenariat.

Properties			
Open (1)	Decoupled (1)	Decentralized (1)	Configurable (1)
Closed (0)	Coupled (0)	Centralized (0)	Not-configurable (0)

Figure 12. Les propriétés définissant le potentiel d'interopérabilité d'un système (Daclin, Chen et Vallespir 2006)

3.2.1.2. Mesure de la compatibilité : approche de (Ducq et Chen 2008)

La compatibilité des systèmes d'information d'entreprises telle que définie dans la section 2.1 est un prérequis pour l'interopération des systèmes. L'évaluation de la compatibilité est alors effectuée lorsque sont connues les propriétés de chacun des systèmes partenaires du réseau collaboratif. La détermination de cette mesure est définie en connaissant au préalable les partenaires de l'interopération et en considérant l'ensemble des barrières à l'interopérabilité, en particulier celles qui s'opposent à l'échange et au partage des informations, des services, des processus et des activités liés au business.

La mesure de la compatibilité peut être élaborée, comme l'a précisé (Ducq et Chen 2008), sur la base d'un questionnaire qui prend en considération d'un côté les barrières conceptuelles, organisationnelles et techniques, et de l'autre côté les informations, les services, les processus et le business. Les données recueillies sont par la suite introduites dans un tableau de valeurs de mesures de la compatibilité (voir Figure 13) en indiquant, pour chaque couple barrière/objet, une valeur égale à 1 lorsqu'une incompatibilité est détectée et égale à 0 dans le cas contraire.

Barriers / Concerns	Conceptual		Organizational		Technology	
	syntactic	*semantic*	*authorities responsibilities*	*organization*	*platform*	*communication*
Business	1	1	0	1	0	0
Processes	1	1	1	1	1	1
Services	1	0	0	0	1	0
Data	0	0	0	1	1	1

Figure 13. Matrice des mesures de la compatibilité (Ducq et Chen 2008)

3.2.1.3. Mesure du degré de couplage : approche de (Castano et Antonellis 1998) et (Bianchini, et al. 2006)

Cette approche fournit un cadre pour exprimer et évaluer quantitativement les relations sémantiques entre les processus d'un ensemble de systèmes d'information. Dans cette approche, chaque système d'information est considéré comme une collection de processus qui produit des services pour accomplir un objectif bien défini. Ainsi, en évaluant les relations sémantiques et en identifiant les répétitions et les chevauchements d'activités, tout en considérant les aspects liés à l'interaction/coopération, cette approche permet d'évaluer le degré de couplage entre des processus et, par suite, entre des systèmes d'information. Ce degré de couplage, noté $AC(P_i, P_j)$, est défini comme suit : $AC(P_i, P_j) = Card\left\{\langle n_{e_k}, n_{e_h}\rangle \middle| P_i \xrightarrow{e_k, e_h} P_j\right\}$ tel que $\left\{\langle n_{e_k}, n_{e_h}\rangle \middle| P_i \xrightarrow{e_k, e_h} P_j\right\}$ est l'ensemble des noms des différentes entités à l'origine du flux entre les processus P_i et P_j de deux systèmes d'information différents. Plus le degré de couplage entre systèmes est important, plus le degré[16] d'interopérabilité est important.

3.2.1.4. Mesure de l'Interoperability-score : approche de (Ford, et al. 2007)

(Ford, et al. 2007) proposent une méthodologie pour mesurer quantitativement l'interopérabilité des systèmes à partir d'un scénario opérationnel, et évoluant dans un réseau de systèmes hétérogènes de par leurs fonctions et/ou leurs architectures.

La méthodologie se déroule en deux étapes :

i. Mesure de l'Interoperability-score (**I-score**) à travers la quantification de la propriété intrinsèque d'un système donné appelée maillage de l'interopérabilité (interoperability **spin**). Cette propriété permet de qualifier l'interopération entre les

[16] Ce que les auteurs appellent degré d'interopérabilité correspond au besoin d'interopérabilité.

systèmes (deux à deux) ; par exemple entre deux systèmes *i* et *j*, la valeur de la propriété de maillage est égale à $s_{ij} \in \{-1, 0, +1\}$. (+1) est attribué quand les deux systèmes interopèrent sans avoir besoin de l'intervention de l'homme ou de la machine. (0) est assigné à une paire de systèmes qui exige un système intervenant (non humain) pour assurer la transformation automatique facilitant l'interopération. (-1) est attribué quand l'intervention humaine assurant la transformation est le seul moyen pour que les deux systèmes interopèrent.

ii. Mesure de l'**I-score optimal** qui correspond à la mesure de l'interopérabilité maximale, si les améliorations possibles sont effectuées en considérant les contraintes opérationnelles et techniques des systèmes interopérants. Cette mesure permet finalement d'évaluer le gain possible lors d'une interopération entre les systèmes.

3.2.1.5. Mesure du couplage de la chaîne logistique : approche de (Barut, Faisst et Kanet 2002)

Il s'agit ici de mesurer le degré de couplage des informations échangées entre les acteurs d'un réseau collaboratif et précisément les acteurs de la chaîne logistique (Supply Chain) à travers les systèmes d'information (voir Figure 14).

Le degré de couplage de la chaîne logistique (DSCC – Degree of Supply Chain Coupling) permet de mesurer la profondeur ou l'étendue de l'échange d'informations (Information Extent *IE*) ainsi que l'intensité de l'information (Information Intensity *II*). Le $DSCC$ est alors égal au couple (IE, II). L'*IE* décrit la profondeur de l'échange de l'information au niveau du réseau (dans la direction des clients ou celle des fournisseurs). Tandis que l'*II* décrit la richesse (la qualité) et la quantité des informations échangées (dans la direction des clients ou des fournisseurs).

Les entreprises ne sont pas couplées à travers leurs chaînes logistiques quand les valeurs d'*IE* et *II* sont égales à 0. Ceci correspond à aucun échange d'information entre les fournisseurs et les clients concernant la demande ou l'inventaire ou le programme de production. D'un autre côté, les entreprises sont fortement couplées si les valeurs des indicateurs sont *IE=II=1*. Toutes les informations dans ce cas sont disponibles pour être partagées et utilisées par tous les acteurs de la chaîne logistique.

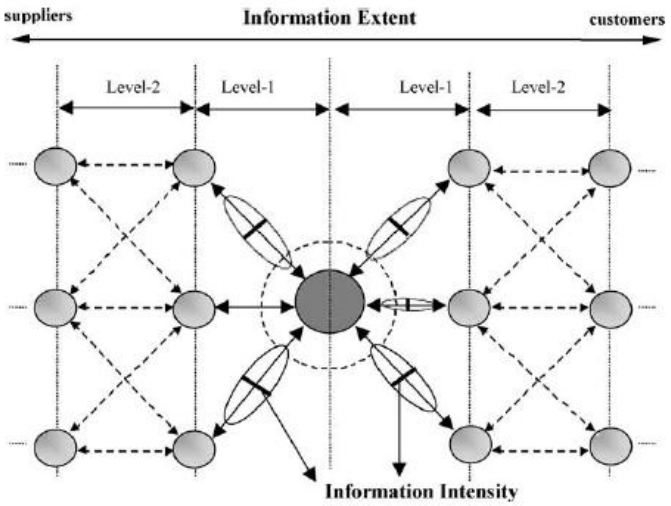


Figure 14. Les deux indicateurs IE et II pour déterminer le degré de couplage des informations de la Supply Chain (Barut, Faisst et Kanet 2002)

3.2.1.6. Mesure de la maturité de l'interopérabilité à travers les modèles de maturité

Les modèles de maturité de l'interopérabilité sont destinés à l'évaluation des étapes de croissances et de maturité qu'un système doit suivre pour aboutir à un niveau exigé de performance pour l'interopérabilité. Ces modèles permettent d'identifier les stades par lesquels les systèmes doivent évoluer et les meilleures pratiques pour améliorer leurs capacités à interopérer.

Plusieurs modèles de maturité ont été développés dans des disciplines différentes et par divers organismes pour répondre aux différentes préoccupations de l'entreprise (informations, services, processus, business).

Parmi les modèles de maturité les plus utilisés, nous pouvons citer, de manière non exhaustive :

1. SoIM : Spectrum of Interoperability Model (LaVean 1980)
2. QoIM : The Quantification of Interoperability Methodology(Mensh, Kite et Darby 1989)
3. MCISI : Military Communications & Information Systems Interoperability(Amanowicz et Gajewski 1996)
4. LISI : Levels of Information System Interoperability Model (C4ISR 1998)
5. IAM : Interoperability Assessment Model(Leite 1998)
6. OIM : Organizational Interoperability Model (Clark et Jones 1999)
7. LCIM : Levels of Conceptual Interoperability Model (Tolk 2003)
8. EIMM: Enterprise Interoperability Maturity Model (ATHENA 2003)
9. Le standard ISO 11354-1:2010 (ISO FDIS 11354-1 2010)

Tels qu'ils sont conçus, ces modèles de maturité peuvent permettre l'évaluation soit du potentiel d'interopérabilité intrinsèque du système, soit de la capacité d'interopération entre plusieurs systèmes à travers l'évaluation de leur compatibilité. Le Tableau 1, extrait des travaux de (Guédria, Naudet et Chen 2008), spécifie pour quelques modèles s'ils se rattachent à l'évaluation de l'interopérabilité potentielle d'un système ou à l'évaluation de l'interopérabilité entre plusieurs systèmes ou les deux.

Tableau 1. Évaluation de l'interopérabilité potentielle d'un système vs. Évaluation de l'interopérabilité entre plusieurs systèmes extrait de (Guédria, Naudet et Chen 2008)

	LISI	OIM	LCIM	EIMM
Interopérabilité potentielle	++	-	-	+
Interopérabilité entre systèmes	+++	+++	+++	+++

Chacun de ces modèles adopte un vocabulaire unique pour exprimer les niveaux de maturité (voir Tableau 2). Cependant, ils sont cohérents (par rapport aux échelles qu'ils définissent) en termes de caractérisation de la maturité et de la capacité à interopérer.

Tableau 2. Caractérisation des modèles de maturité (Panetto 2006)

					Organisationnelle
			Sémantique		
Technique					
Modèle	Niveau 1	Niveau 2	Niveau 3	Niveau 4	Niveau 5
LISI	Isolé	Connecté	Distribué	Intégré	Universel
LCIM	Spécifique	Documentée	statique	dynamique	Harmonisé
OIM	Independent	Ad-hoc	Collaboratif	Intégré	Unifié

On peut noter que la plupart de ces modèles de maturité n'abordent pas à la fois l'ensemble des typologies d'interopérabilité (voir section 2.1). Dans le cas où ils le font, ils se concentrent sur une partie seulement des typologies d'interopérabilité (organisationnel, technique…), à part l'ISO 11354-1:2010 (ISO FDIS 11354-1 2010). Par ailleurs, (Santos, et al. 2008) suggère qu'un modèle de maturité devrait servir à évaluer la maturité des différentes organisations non seulement en terme d'interopérabilité, mais aussi en terme de capacités de collaboration en soi. Toujours selon (Santos, et al. 2008), cette évaluation pourrait être exécutée par un auditeur externe ou effectuée par l'organisation cible par auto - évaluation.

3.2.2. Évaluation de l'interopération *a posteriori* après la phase de conception du système de systèmes d'information collaboratifs

L'évaluation de l'interopération s'effectue *a posteriori* de la phase de conception du système de systèmes d'information collaboratifs (SdSI). Elle consiste à évaluer la performance de l'interopération des systèmes d'information d'entreprises une fois que la collaboration a été mise en place.

3.2.2.1. Mesure de la performance de l'interopération

Évaluer la performance d'une entreprise donnée, que ce soit une entreprise isolée ou en réseau avec d'autres entreprises, revient à évaluer les coûts, les délais et la qualité (voir Figure 15). Ceci repose sur :

- **La maîtrise voire la réduction des coûts** à travers « *la standardisation et la réduction du nombre d'outils utilisés, notamment pour les outils logiciels, les outils matériels (de l'atelier par exemple), les outils de communication (téléphone, fax, coursier, mail, courrier...), ...* » (Blanc 2006)
- **L'atteinte d'une qualité sans faille**, et ceci en garantissant que « *les informations sont fiables c'est-à-dire qu'elles doivent être complètes et conformes à ce qu'a envoyé l'expéditeur (ceci permet d'améliorer la qualité des échanges et des produits) ce qui n'exclut pas la manipulation de l'information par d'autres personnes; et que les produits sont fiables c'est-à-dire qu'ils doivent respecter le cahier des charges et être de qualité constante.* » (Blanc 2006)
- **La fiabilisation et la diminution des délais**, en garantissant que « *l'information soit délivrée au bon moment c'est-à-dire au moment où l'utilisateur en a besoin et uniquement à ce moment-là, qu'aucune opération intermédiaire ne doit être nécessaire avant l'exploitation de l'information ou du produit, et que toutes les informations ou produits soient utilisés. Si tel est le cas, cela évite une perte de temps et d'argent pour l'expéditeur qui aurait envoyé des informations ou produits en vain.* » (Blanc 2006)



Figure 15. Évaluation de la performance d'une entreprise

3.2.2.2. Les approches de Coûts des Composantes et des Coûts Globaux développées par le NIST

(Tassey, Brunnermeier et Martin 1999) et (Gallaher, et al. 2004) ont développé les approches des Coûts des Composantes et des Coûts Globaux (Figure 16) permettant d'identifier les coûts d'évitement, d'atténuation, de retard, d'interopérabilité à travers la détermination des métriques d'impacts techniques et les métriques d'impacts économiques.

- Approche des Composantes de Coûts (Cost Component Approach) consiste à additionner les composantes de coût à travers les métriques d'impact pour évaluer les coûts d'interopérabilité totaux dans l'industrie.
- Approche des Coûts Globaux (Aggregate Cost Approach) consiste à interviewer les experts de l''industrie sur les coûts liés à l'interopération pour donner une estimation globale de ce coût et ceci en évaluant, en totalité, les composantes de coûts d'interopération. De plus, au coût de l'interopérabilité, va se rajouter le coût lié au retard causé par l'interopération partielle.

L'approche des Coûts des Composantes se base sur les informations fournies par l'industrie et d'autres sources. Les experts fournissent seulement les données de l'évaluation de chacune des composantes des coûts. Cependant, l'approche des Coûts Globaux permet aux experts de l'industrie de considérer en plus les coûts d'interopération qui ne peuvent pas être considérés lors de la détermination des métriques d'impact, fournissant ainsi une vision large du calcul des coûts.

Source of Cost	Total Cost ($Thousands)	Percent of Cost
Cost Component Approach		
Avoidance cost	52,799	5
Mitigating costs	907,645	86
Delay cost	90,000	9
Total	1,050,444	100
Aggregate Cost Approach		
Interoperability cost	925,602	91
Delay cost	90,000	9
Total	1,015,602	100

Figure 16. Les deux approches de calcul des coûts (Tassey, Brunnermeier et Martin 1999)

3.2.2.3. L'approche par évaluation de la performance du processus d'interopération de (Chen, Vallespir et Daclin 2008)

Cette approche d'évaluation de la performance du SdSI repose sur la définition de métriques pour :

1. Estimer la durée totale du processus d'interopération $t_in eff$ défini par : $t_in eff = \Delta t_{req} + \Delta t_{treat} + \Delta t_{ret} + t_{use}$

   Où :
   - $t_in eff$ représente la valeur réelle de la durée totale du processus d'interopération
   - Δt_{req} représente la durée de la requête (envoi de l'information)
   - Δt_{treat}, représente la durée du traitement de la requête
   - Δt_{ret} représente la durée de retour
   - Δt_{use} représente la durée d'utilisation

2. Évaluer la qualité de l'interopération : échange, utilisation et conformité (comparaison entre la valeur attendue et la valeur calculée) : $q_{in} = \Delta q_{ex} + |\Delta q_{ut}| + \Delta q_{conf}$

   Où :
   - q_{in} est la qualité de l'interopération
   - Δq_{ex} est la qualité d'échange
   - $|\Delta q_{ut}|$ est la valeur absolue d'utilisation
   - Δq_{conf} est la qualité de conformité

3. Évaluer le coût de l'interopération (comparaison entre la valeur attendue et la valeur calculée) : $C_{in} = C_{ex} + C_{ut}$

   Où :
   - C_{in} est le coût de l'interopération
   - C_{ex} est le coût lié à l'échange d'information
   - C_{ut} est coût nécessaire pour rendre les informations échangées utilisables

3.2.2.4. L'approche par indicateurs clés de performance le l'interopération (Camara, Ducq et Dupas 2010)

Cette approche repose sur l'identification d'indicateurs clés de performance (KPI) comme étant une agrégation du coût, du temps et de la qualité de la performance de l'interopération. Ces mesures sont issues de la quantification de l'impact opérationnel des investissements en interopérabilité sur les processus business en termes de performance.

Les auteurs définissent un cadre fondé sur un système de mesure de la performance et un modèle causal de mesure de performance. Les indicateurs définis pour le système de mesure de la performance sont identifiés selon quatre composantes : les indicateurs de performance du processus, les indicateurs de performance opérationnels, les indicateurs de performance tactiques et les indicateurs de performance stratégiques. Par ailleurs, le modèle causal de mesure de performance lie l'ensemble des indicateurs des quatre composantes et matérialise la relation entre les différents niveaux du cadre proposé. Il établit ainsi, comment l'impact de l'interopérabilité au niveau opérationnel peut être transformé en un impact positif au niveau tactique et stratégique.

L'évaluation est basée sur l'observation du résultat. En effet, on observe le résultat du processus de l'application, et on évalue le résultat sans regarder ce qu'on échange. On évalue ainsi la capacité des applications à réaliser ce qui est demandé.

3.2.3. Analyse des caractéristiques et typologies des mesures d'interopérabilité

Les différentes approches et méthodes que nous avons présentées pour évaluer l'interopérabilité *a priori* ou l'interopération *a posteriori* présentent différentes caractéristiques et englobent différentes typologies.

Nous présentons ci-dessous un tableau récapitulant les différentes caractéristiques de chacune des approches que nous avons introduites dans cette section (voir Tableau 3).

Tableau 3. Les caractéristiques des mesures

Approche	Références	Type d'interopérabilité	La mesure	A priori/ a posteriori	Type de mesures	Boîtes blanches/ boîtes noires	Interopérabilité propre à un système / relatifs à plusieurs systèmes
Mesure du potentiel d'interopérabilité	(Daclin, Chen et Vallespir 2006) et (Chen, Vallespir et Daclin 2008)	Tous types	{open, closed, coupled, decoupled, configurable,…}	A priori	Qualitative	Boîtes noires	système
Mesure de la compatibilité	(Ducq et Chen 2008)	Interopérabilité organisationnelle, sémantique et technique	{0,1}	A priori	Qualitative	Boîtes noires	Plusieurs systèmes
Mesure du degré de couplage	(Castano et Antonellis 1998) et (Bianchini, et al. 2006)	Tous types	Mesures numériques et empiriques	A priori	Quantitative	Boîtes blanches	Plusieurs systèmes
Mesure de l'Interoperability-score	(Ford, et al. 2007)	Tous types	Mesures numériques	A priori	Quantitative	Boîtes noires	Plusieurs systèmes
Mesure du couplage de la chaîne logistique	(Barut, Faisst et Kanet 2002)	Interopérabilité sémantique	Mesures numériques	A priori	Quantitative	Boîtes noires	Plusieurs systèmes
SoIM	(LaVean 1980)	Interopérabilité technique	{1,2,3,4,5,6,7} par paire de système	A priori	Qualitative	Boîtes noires	Plusieurs systèmes
QoIM	(Mensh, Kite et Darby 1989)	Divers types	x/y est le ratio pour chacun des 7 composants où x, y sont des entiers positifs	A priori	Quantitative	Boîtes noires	Plusieurs systèmes
MCISI	(Amanowicz et Gajewski 1996)	Interopérabilité technique	Entier positif par paire de système	A priori	Quantitative	Boîtes noires	Plusieurs systèmes
LISI	(C4ISR 1998)	Interopérabilité technique	Xny par système d'information, où X∈{General, Expected, Specific},n∈{0,1,2,3,4},y∈{a…z}	A priori	Qualitative	Boîtes noires	Système/plusieurs systèmes
IAM	(Leite 1998)	Interopérabilité technique	Mesures numériques et empiriques par système	A priori	Qualitative/ quantitative	Boîtes noires	système
OIM	(Clark et Jones 1999)	Interopérabilité opérationnelle	{0,1,2,3,4} par organisation	A priori	Qualitative	Boîtes noires	Système/plusieurs systèmes
LCIM	(Tolk 2003)	intégration	{0,1,2,3,4} par modèle	A priori	Qualitative	Boîtes noires	Plusieurs systèmes
EIMM	(ATHENA 2003)	Interopérabilité organisationnelle	{1,2,3,4,5 } par paire de système	A priori	Qualitative	Boîtes noires	

ISO 11354-1:2010	(ISO FDIS 11354-1 2010)	Divers types	{1,2,3,4,5 } par paire de système avec des mesures numériques	A priori	Qualitative/ quantitative	Boîtes noires	Plusieurs systèmes
Les approches de Coûts des Composantes et des Coûts Globaux	**Source spécifiée non valide.** et (Gallaher, et al. 2004)	Interopérabilité technique	Mesures numériques et empiriques	A posteriori		Boîtes noires	Plusieurs systèmes
L'approche de l'évaluation de la performance	(Chen, Vallespir et Daclin 2008)	Tous types	Mesures numériques	A posteriori	Quantitative	Boîtes noires	Plusieurs systèmes
L'approche de des indicateurs clé de performance	(Camara, Ducq et Dupas 2010)	Tous types	Mesures numériques	A posteriori	Quantitative	Boîtes noires	Plusieurs systèmes
Notre approche d'évaluation	**Manuscrit de thèse**	**Interopérabilité sémantique**	Mesures numériques : $\boldsymbol{\nu_{1\to2}}$,$\boldsymbol{\nu^{e}_{1\to2}}$, $\boldsymbol{\varepsilon_{1\to2}}$, $\boldsymbol{\varepsilon^{e}_{1\to2}}$	**A priori**	**Qualitative/ quantitative**	**Boîtes blanches**	**Plusieurs systèmes**

3.2.4.Synthèse des caractéristiques des mesures de l'interopération

(Kasunic et Anderson 2004) considèrent que l'interopérabilité est un sujet large et complexe et que le développement de mesures précises et leur application est une tâche difficile. Cependant, les auteurs reconnaissent qu'évaluer l'interopérabilité à l'aide des mesures bien choisies est essentiel pour identifier les priorités à considérer lors de la collaboration des entreprises en réseau.

L'étude des mesures existantes pour évaluer l'interopération réalisée dans les sections précédentes permet de mettre en évidence des caractéristiques communes ainsi que de pointer les avantages et faiblesses de chacune d'elles.

3.2.4.1. A priori vs. a posteriori

Évaluer l'interopérabilité ***a priori*** de la mise en collaboration des entreprises a pour objectif d'évaluer leur capacité à interopérer et donc de mettre en œuvre un ensemble d'actions d'amélioration afin d'atteindre un degré d'interopérabilité souhaité. En revanche, l'évaluation ***a posteriori*** de l'interopération (et donc de l'action d'interopérer) conduit à élaborer des stratégies d'améliorations tout en considérant des critères liés à la performance globale du réseau collaboratif.

Ces deux approches sont totalement complémentaires. Nos travaux contribuent à l'ingénierie d'un système collaboratif et nous nous intéressons uniquement à l'interopérabilité *a priori* en tenant compte au préalable, de l'ensemble des exigences d'interopérabilité, ce qui permet ainsi de les anticiper sans avoir à remettre en cause l'ingénierie *a posteriori* de ce système. Toutefois, une évaluation *a posteriori* pourrait être utilisée pour vérifier si les performances attendues du système collaboratif sont atteintes (validation).

3.2.4.2. Vision boîte blanche vs. Vision boîte noire

Dans le cadre de l'évaluation de la compatibilité, l'étude des systèmes, vus comme des **boites noires**, consiste principalement dans l'étude de leurs entrées et sorties sans se préoccuper des propriétés intrinsèques de ces systèmes qui influent sur leurs interactions mutuelles.

L'étude de l'interopérabilité sémantique des systèmes d'information d'entreprises nécessite, de notre point de vue, une vision plus détaillée sur les informations échangées et précisément leur sémantique, pour vérifier l'effectivité des échanges. Ceci nécessite finalement d'ouvrir les systèmes comme des **boîtes blanches** pour voir ce qui se passe à l'intérieur du point de vue sémantique.

3.2.4.3. Métriques qualitatives vs. Métriques quantitatives

Les approches d'évaluation de l'interopérabilité présentent une diversité des mesures qui peuvent être soit qualitatives soit quantitatives.

- Les métriques **qualitatives** sont pour la plupart subjectives et sont construites sur la base des critères d'évaluation généraux en attachant un niveau de maturité à un type spécifique d'interopérabilité (Panetto 2007),(Chen et Daclin 2007) et (Guédria, Naudet et Chen 2008). Les modèles de maturité utilisent pour la plupart des mesures qualitatives. En revanche, (Jochem 2010) considère qu'un niveau élevé d'interopérabilité n'est pas nécessairement un signe d'excellence ou de maturité, en raison du fait que le niveau optimal d'interopérabilité dépend d'un côté de l'interopérabilité elle-même mais surtout des imprévus qui perturbent cette interopérabilité.

  Les **inconvénients** que présentent ces approches qualitatives sont, d'une part, qu'elles manquent de définitions formelles spécifiant les frontières entre chaque niveau de maturité et, d'autre part, qu'elles nécessitent un niveau d'expertise très élevé pour pouvoir appliquer ces modèles dans un contexte industriel(Ford, et al. 2007).
- Les métriques **quantitatives** définissent des mesures numériques pour caractériser l'interopération comme l'I-score, le DSCC ou les mesures définies par (Castano et Antonellis 1998) et (Bianchini, et al. 2006). Certains modèles de maturité définissent aussi des mesures numériques (SoIM, QoIM, MCISI, IAM, LCIM).

3.2.4.4. Mesures numériques vs. Mesures littérales

Pour spécifier le niveau de maturité attribué à chacune des mesures, nous avons recours à différentes échelles. Ces dernières peuvent être :

- Des valeurs entières allant de 1 à 6, pour quelques modèles de maturité ;
- Des valeurs réelles comprises entre 0 et 1 ;
- Un ensemble qualifiant les niveaux allant de « isolé » jusqu'à « intégré » par exemple ;

Par ailleurs, une partie des approches que nous avons présentées précédemment définissent des mesures formelles en appliquant des théories mathématiques (matrice de couplage, I-score, DSCC,…).

3.2.4.5. Synthèse : complémentarité de notre approche

Nous constatons, à travers l'étude des diverses caractéristiques des approches présentées et synthétisées dans le **Erreur ! Source du renvoi introuvable.** que celles ayants une vision boîte blanche (connaissance de la sémantique métier) ne présentent aucun critère qualitatif associé à l'interopérabilité ; par ailleurs, elles fournissent uniquement des mesures quantitatives. De plus, si on considère les approches qui reposent sur des métriques qualitatives, elles gardent une vision boîte noire de la sémantique métier des systèmes d'informations.
L'approche que nous proposons est ainsi complémentaire dans la mesure où nous introduisons une approche avec une vision boîte blanche et et qui fournit des mesures qualitatives et quantitatives.

4. Notre stratégie d'Évaluation de l'interopérabilité

4.1. Positionnement

Mesurer la performance de l'interopération sémantique des systèmes *a posteriori* de l'occurrence de l'action d'interopération est une tâche risquée dans la mesure où le résultat – s'il est négatif (conclut à la non-interopérabilité) – peut impliquer une complète remise en cause du réseau d'entreprises et au final des coûts de réingénierie très importants (cf. coûts d'atténuation dans la section 2.3.1). Ce problème est un problème connu dans le domaine de l'Ingénierie Système où l'on sait qu'il vaut mieux prendre en compte une exigence dès la conception du système plutôt que de devoir faire une réingénierie du système parce que l'exigence n'a pas été prise en compte. Ce constat reste vrai dans le cas particulier des systèmes d'information collaboratifs où l'interopérabilité peut être considérée comme une exigence du système de systèmes d'information. Il apparaît donc comme important de se doter d'un système de mesure de l'interopérabilité qui permet d'évaluer si l'exigence d'interopérabilité peut être satisfaite par les systèmes d'information candidats à la mise en collaboration. Nous avons donc opté pour l'évaluation de l'interopérabilité ***a priori*** à travers l'analyse des modèles conceptuels des différents systèmes d'informations d'entreprises collaboratives.

Plus précisément, notre contribution consiste à proposer des **métriques quantitatives et qualitatives** pour quantifier et qualifier l'échange d'informations à travers une approche basée sur la formalisation des relations sémantiques entre des systèmes, vus comme des **boîtes blanches,** et ceci en analysant la sémantique détaillée de leurs modèles conceptuels.

En reprenant les caractéristiques déjà utilisées pour présenter les approches existantes à la section 3, notre approche se positionne comme dans le Tableau 4.

Tableau 4. Positionnement de notre approche

Approche	Type d'interopérabilité	La mesure	A priori/ a posteriori	Type de mesures	Boîtes blanches/ boîtes noires	Interopérabilité d'un système/plusieurs systèmes
Notre approche d'évaluation	Interopérabilité sémantique	Mesures numériques : $\nu_{1\to2}, \nu^{e}_{1\to2}$, $\varepsilon_{1\to2}, \varepsilon^{e}_{1\to2}$	A priori	Quantitative /qualitative	Boîtes blanches	Plusieurs systèmes

4.2. Scénario

Nous avons choisi d'illustrer notre approche à travers un scénario spécifique qui met en œuvre deux systèmes d'information SI_1 et SI_2 qui doivent interopérer dans un contexte d'entreprises collaboratives ou au sein d'une même entreprise pour des fonctionnalités complémentaires.

Conformément à la définition de l'interopérabilité adoptée dans ce mémoire de thèse et présentée dans la section 2.1, nous considérons que le système d'information SI_1 a la capacité d'interopèrer sémantiquement avec le système d'information SI_2 si les propriétés suivantes sont satisfaites :

(P1) **Propriété 1.** SI_1 est capable d'échanger des informations avec SI_2,
(P2) **Propriété 2.** SI_2 comprend une partie au moins de la sémantique métier des informations échangées et,
(P3) **Propriété 3.** SI_2 exploite convenablement les informations échangées pour réaliser sa mission.

Cette définition implique que (voir Figure 17) :

1) L'échange des informations entre SI_1 et SI_2 est possible grâce à des interfaces compatibles (**P1,** l'interopérabilité technique).
2) (**P2**) implique que des relations sémantiques entre les modèles conceptuels existent, permettant de comprendre les informations échangées.
3) Pour que SI_2 puisse utiliser d'une manière effective les informations échangées (c'est-à-dire exploiter convenablement ces informations, (**P3)**), il faut que les informations échangées soient suffisantes pour correspondre sémantiquement (relation sémantique de subsomption) à toutes les informations nécessaires du modèle conceptuel de SI_2 .

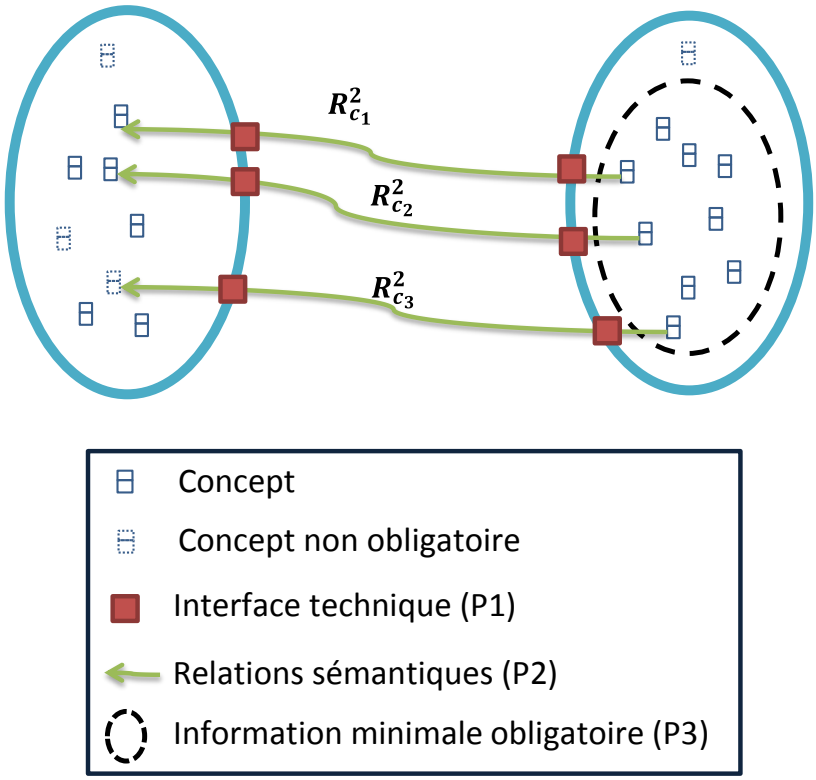


Figure 17. Propriétés de l'interopération

4.3. Structure de notre proposition d'évaluation

Dans la suite du mémoire, nous faisons l'hypothèse que l'interopérabilité technique est satisfaite et que par suite la propriété P1 l'est. Cette hypothèse tend à être raisonnable dans la mesure où les standards d'échange répondent au moins partiellement au problème d'interopérabilité technique. Cette hypothèse est justifiée dans la mesure où nous nous intéressons exclusivement à l'étude de l'interopérabilité sémantique.

Les propriétés (P2) et (P3) mettent en évidence des problématiques qui sont au cœur de nos travaux. Elles peuvent être énoncées comme suit :

1. Pour chaque système d'information, il est nécessaire de disposer d'un modèle conceptuel statique qui contient toute la sémantique métier du système. En effet, nous étudions l'interopérabilité sémantique des systèmes d'information à travers leur modèle conceptuel. A minima, ces modèles doivent contenir la sémantique métier des systèmes étudiés.
2. Il est nécessaire de définir, formaliser et extraire la sémantique métier minimale et nécessaire à un système d'information pour fonctionner.
3. Il est nécessaire de définir, formaliser et construire les relations sémantiques entre les modèles conceptuels statiques des systèmes étudiés.

Répondre à ces problématiques doit permettre à terme de répondre à la problématique plus générale de nos travaux : l'évaluation de l'interopérabilité sémantique.

Pour répondre à ces problématiques, la suite du mémoire de thèse se structurera comme suit (voir Figure 18) :

1) Le chapitre 2 a pour but de proposer une approche qui permet d'expliciter et de compléter la sémantique tacite des modèles conceptuels des systèmes d'information d'entreprises (problématique 1). De plus, le chapitre 2 formalise des agrégats de concepts qui mettent en évidence la structure sémantique minimale et nécessaire du modèle conceptuel (problématique 2).
2) Le chapitre 3 propose une formalisation des relations sémantiques existantes entre les modèles conceptuels (problématique 3). Dans ce chapitre, nous définissons également des métriques permettant d'évaluer qualitativement et quantitativement le degré d'interopérabilité entre les modèles conceptuels de systèmes d'information d'entreprises et d'en déduire alors l'écart sémantique entre ces modèles.

5. Conclusion

La collaboration d'entreprises est une nécessité qui a fait émerger une nouvelle architecture d'entreprises : les réseaux d'entreprises collaboratives.

Ce paradigme implique des demandes croissantes en informations et donc en échange d'informations entre les différents systèmes d'information d'entreprises. Ces informations sont distribuées et supportent divers formats mettant en évidence des problématiques d'interopérabilité sémantiques entre les systèmes d'entreprises existants. Ces problématiques impliquent des coûts plus au moins importants pour les entreprises. Ainsi, maîtriser ces coûts représente un levier important et passe par l'évaluation de l'interopération sémantique.

Nous avons présenté dans ce chapitre, un état de l'art des travaux d'évaluation de l'interopération, et nous avons situé l'apport que présente notre approche par rapport aux autres.

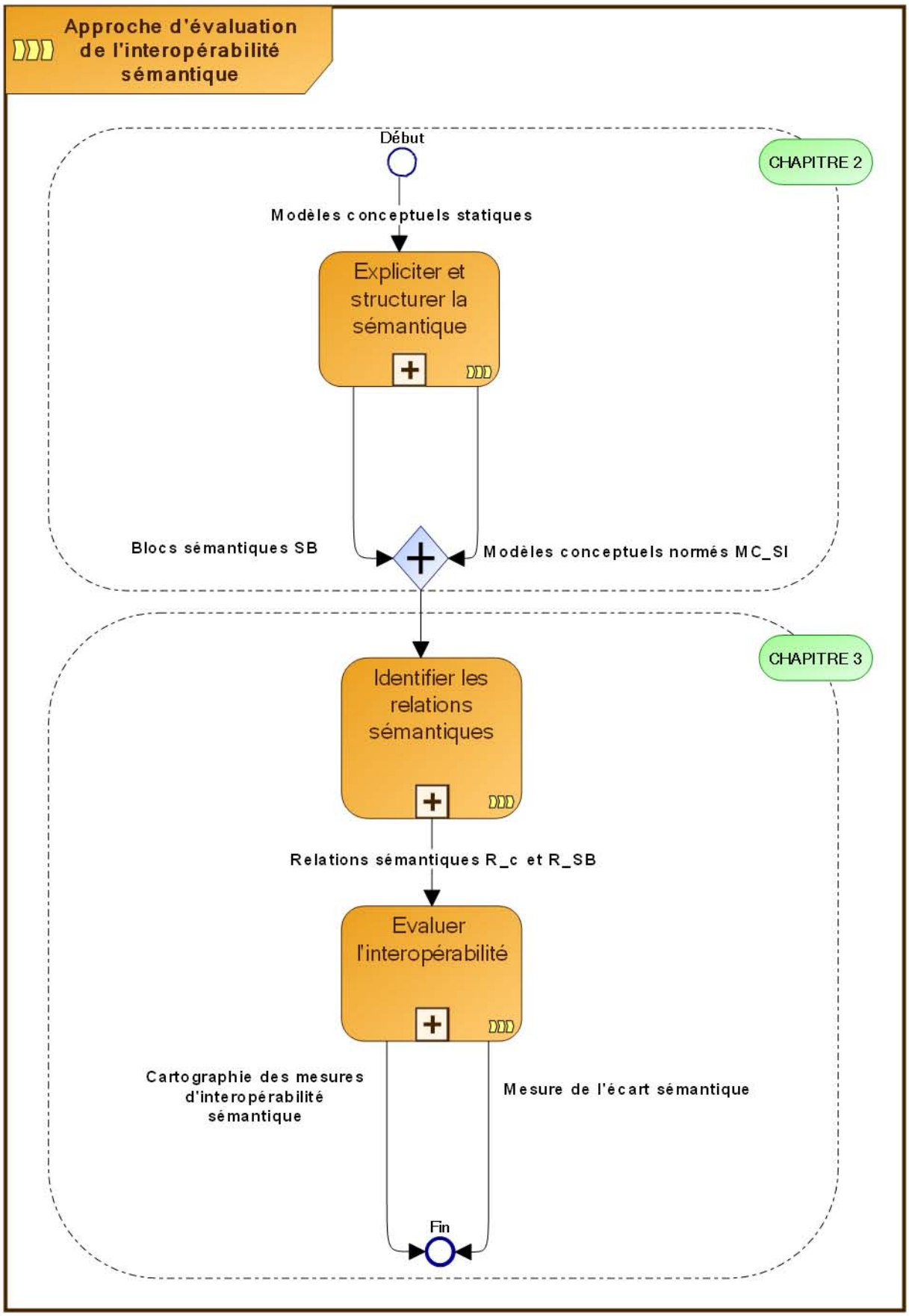


Figure 18. Notre approche d'évaluation d'interopérabilité sémantique

Chapitre 2 : Explicitation et structuration de la sémantique des systèmes d'information d'entreprises

Introduction

Assurer l'interopérabilité sémantique entre différents systèmes d'informations, dans le contexte des entreprises collaboratives, nécessite l'analyse et la manipulation de leurs modèles conceptuels. Un constat général montre que ces modèles conceptuels, dans leur état actuel, sont souvent non exploitables pour évaluer l'interopération. En effet, la sémantique de ces modèles conceptuels, de par leur hétérogénéité (outils, méthodes), est souvent implicite, voire bruitée par des exigences liées à l'implémentation ou non exprimée car dépendante du métier et des expériences de modélisation.

Expliciter la sémantique métier implicite est ainsi une étape nécessaire dans la mesure où nous cherchons à étudier l'interopérabilité à travers la formalisation des relations sémantiques entre les concepts des systèmes d'informations mis en œuvre.

Nous décrivons, dans ce chapitre, les défis associés à l'extraction de la sémantique métier essentiellement appliquée aux modèles de systèmes d'information, et nous proposons une méthode pour l'explicitation de cette sémantique au niveau de leurs modèles conceptuels statiques. Cette approche permet, à terme, d'expliciter et structurer de la sémantique métier tacite dans le but de l'utiliser pour l'étude et l'analyse des modèles d'entreprise (Voir Figure 19).

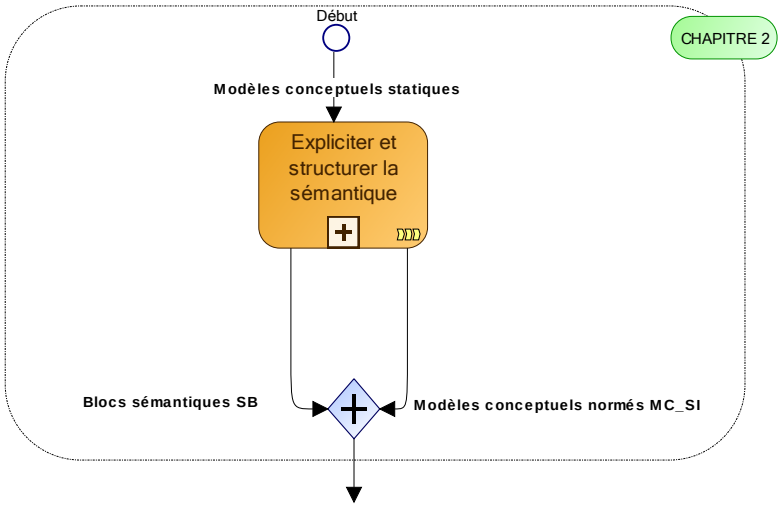


Figure 19. Structure du chapitre 2

Nous proposons, dans un premier temps, de « normer » les modèles conceptuels de SI à travers l'approche « fact-oriented modelling [17]» de (Nijssen et Halpin 1989) qui permet de mettre en évidence tous les concepts ontologiques sous-jacents d'un modèle afin de les rendre explicites, et produit ainsi un modèle sémantique normé, c'est à dire indépendant de la pratique de modélisation utilisée pour la construction du modèle initial.

Dans un deuxième temps, nous proposons de structurer la sémantique métier du modèle sémantique obtenu précédemment pour faciliter la compréhension de la connaissance incorporée dans le cœur des modèles d'entreprise. L'approche adoptée propose tout d'abord d'identifier les concepts « cœur de métier » (core knowledge) puis fait émerger ensuite ce que nous appelons des blocs sémantiques (des agrégats de concepts). Nous avons également développé un algorithme qui permet de construire automatiquement ces blocs sémantiques (Yahia, Aubry et Panetto 2011).

1. Caractéristiques des modèles conceptuels des systèmes d'information d'entreprises

1.1. Constats

Les Systèmes d'Information sont des outils qui participent à la gestion, au traitement, au transport et à la diffusion de l'information au sein d'une organisation ou de plusieurs organisations en réseau. Ils sont au cœur du processus de la création de la valeur d'autant plus qu'ils contribuent à l'atteinte des objectifs de l'organisation. Le contexte collaboratif a fait émerger la nécessité de faire interopérer une multitude de systèmes d'information, autonomes et hétérogènes (architectures, fonctions, modèles…), pour assurer l'objectif désiré de la collaboration.

Ce besoin en interopération entre les différents Systèmes d'information requiert que les informations soient physiquement échangées (l'interopérabilité technique), soient comprises (l'interopérabilité sémantique) et soient utilisées pour atteindre le but pour lequel elles ont été produites (l'interopérabilité sémantique et organisationnelle). D'ailleurs, pour un système d'information donné, l'assimilation des informations envoyées par un système à un autre fait appel à cinq niveaux d'interopérabilité tels que proposés par (Euzenat 2001).

Chaque niveau ne peut pas être réalisé si les niveaux précédents ne le sont pas (Euzenat 2001) :

[17] Dans la suite du manuscrit de thèse, nous utilisons cette appellation anglophone **«** Fact-oriented modelling » vu que la traduction française « modélisation orientée faits » perdrait de sa sémantique originale.

1. *Encodage : la capacité de segmenter la représentation en caractères;*
2. *Lexical : la capacité de segmenter la représentation en mots (ou symboles);*
3. *Syntactique : la capacité de structurer la représentation en phrases structurées (ou formules ou affirmations);*
4. *Sémantique : la capacité de construire la signification logique de la représentation;*
5. *Sémiotique : la capacité de construire la signification pragmatique de la représentation (ou sa signification dans le contexte).*

Les solutions proposées pour atteindre les 3 premiers niveaux (encodage, lexical et syntaxique) sont pour la majorité des solutions techniques, mais elles restent non suffisantes quand il s'agit d'assurer d'une manière pratique l'interopération entre les différents systèmes d'information.

En ce sens, nos travaux de recherche, tels qu'introduits dans le chapitre précédent, portent exclusivement sur l'interopérabilité sémantique et donc sur l'étude des systèmes d'information à travers l'étude de leurs modèles conceptuels.

Il a été constaté (Chapurlat 2007) (Castano et Antonellis 1998) que les systèmes d'information sont pour la plupart définis et conçus par différents experts ayant chacun leur propre expérience de modélisation (voir Figure 20). Ils font appel, par la suite, à une multitude de modèles d'entreprise qui sont nécessairement hétérogènes de par leur représentation.

Constat de (Chapurlat 2007)

«Un modèle est bâti à la demande et considéré à priori comme inutilisable en dehors du périmètre du projet pour lequel il a été construit. De plus, le travail de modélisation est généralement fait par un acteur extérieur, consultant en organisation ou chargé de l'installation d'un ERP par exemple. Le résultat reste donc difficilement exploitable par les acteurs de l'entreprise. »

Constat de (Castano et Antonellis 1998)

«Major problems arising with a name-based approach are related to the fact that different processes can be characterized by the same or semantically similar entities and operations, which do not necessarily have the same name. In fact, the probability that two designers picking the same name for a given entity is very low (i.e., it ranges from 7% to 18%). »

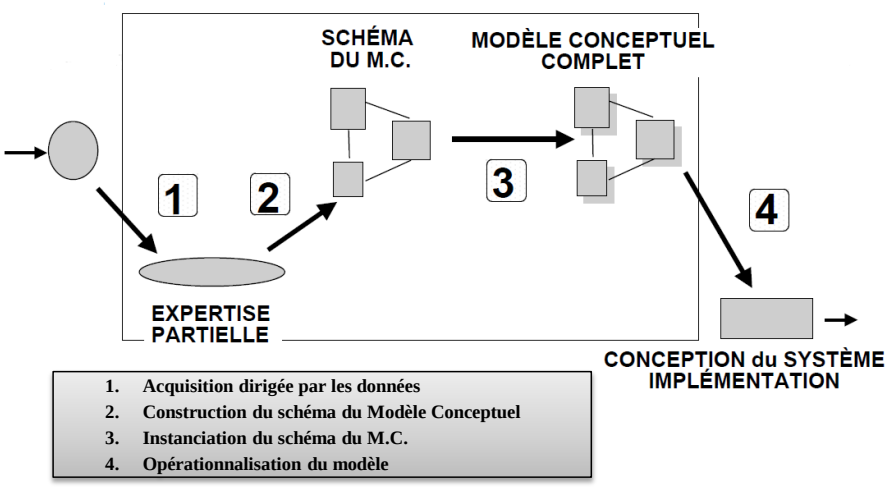


Figure 20. Étapes de la conception d'un système d'information. Source cours ingénierie de connaissance[18]

L'hétérogénéité des modèles conceptuels d'entreprise se situe alors à deux niveaux : syntaxique et sémantique.

1. **L'hétérogénéité syntaxique** prend place selon (Benhlima et Chiadmi 2006) au niveau des formats de stockage des données (XML, etc.), dans les langages d'interrogation (XQuery, SQL, OQL, etc.), dans les protocoles d'accès (HTTP, etc.), dans les interfaces, etc.
2. **L'hétérogénéité sémantique** résulte selon (Park et Ram 2004) des différences entre les interprétations du monde réel par les modélisateurs durant le processus de conception des systèmes d'information. Ces différences concernent le contexte et l'utilisation des données et engendrent des conflits sémantiques qui peuvent survenir au niveau des schémas et/ou des données (schema-level, data-level).
   (Kavouras 2003) attribue, par exemple, les causes qui peuvent générer des hétérogénéités sémantiques aux :
   - Différence de couverture (niveau de détail)
   - Différence de classification (conceptualisation)

Il est relativement aisé de remédier aux défauts causés par l'hétérogénéité syntaxique et ceci à travers les standards d'échanges d'informations (STEP, ISO…). En revanche, remédier aux conflits sémantiques est une tâche difficile vue la nature de ces conflits. Nous caractérisons, dans la section qui suit, l'ensemble des conflits issus de l'hétérogénéité sémantique.

[18] Cours d'Ingénierie des connaissances, modélisation élaboré par Nathalie Aussenac-Gilles (IRIT) et Jean Charlet (DSI/AP-HP), http://www.irit.fr/GRACQ/IMG/pdf/IC-Modelisation00.pdf

1.2. Les conflits sémantiques

L'étude des différents conflits sémantiques indique que les conflits au niveau des données résultent pour la plupart de l'utilisation de données différentes selon les domaines d'application (e-gov, e-commerce, bio-informatique, etc.) qui mettent en avant des interprétations différentes. (Park et Ram 2004) identifient plusieurs typologies de conflits au niveau des données[19] : «Valeur de données, représentation de données, unité de données, précision de données, niveau de données » (Voir Figure 21).

Les conflits de schémas sont, quant à eux, caractérisés par des différences dans les structures logiques et/ou par l'inconsistance des métadonnées du domaine de l'application (Park et Ram 2004), et peuvent être des conflits de type[20] : « Nommage, identificateur d'entité, isomorphisme de schéma, généralisation, agrégation, divergences schématiques » (voir Figure 21).

Types de conflits		
Les conflits de donnée	Valeur de données	
	Représentation de données	
	Unité de données	
	Précision de données	Granularité des données
		Résolution spatiale
	Fiabilité de la valeur de donnée	
	Domaine spatial	
Les conflits de schémas	Nommage	Attributs synonymes
		Attributs homonymes
		Entité synonymes
		Entité homonymes
	Identificateur d'entité	
	Isomorphisme de schéma	
	Généralisation	
	Agrégation	
	Divergences schématiques	Valeur de donnée/Attribut
		Attribut/Entité
		Entité/Valeur de donnée

Figure 21. Les typologies de conflit .Source (Park et Ram 2004)

[19] *Data-value, data-representation, data-unit, data-precision, data-level*

[20] *Naming, entity-identifier, schema isomorphism, generalisation, aggregation, schematic discrepancies*

(Goh, Madnick et Siegel 1995) proposent quatre catégories principales de conflit liées à l'hétérogénéité sémantique :

- **Les conflits de nommage** sont liés aux différences dans la désignation de concepts liées à la présence de synonymes, d'homonymes, d'hyperonymes et d'hyponymes. (Benhlima et Chiadmi 2006) distingue ces différents cas de figures : *les synonymes sont deux mots distincts ayant le même sens. C'est l'exemple de "publication" et "article" qui capturent la même information sur les articles de recherche publiés. Les homonymes sont des mots partageant la même graphie et la même prononciation mais n'ayant pas le même sens. Par exemple, "mémoire" peut faire référence à des entités différentes: "mémoire informatique" et "mémoire de thèse". Les hyperonymes et les hyponymes indiquent des niveaux d'une hiérarchie désignés par le concept plus "général" ou le concept moins "général". C'est le cas de "personne" qui est un hyperonyme de "employé" car c'est un terme plus "général".*
- **Les conflits de mesures** (d'échelle) prennent place quand des systèmes de référence différents sont utilisés pour mesurer la même grandeur (exemple de "Fahrenheit" et "Celsius" pour la mesure de la température).
- **Les conflits de confusion** (d'indéterminisme) apparaissent quand les concepts semblent avoir le même sens alors qu'il n'en est rien. Ceci peut être dû à des contextes temporels différents.
- **Les conflits de représentation** surgissent quand les schémas de deux sources décrivent différemment un même concept. (Benhlima et Chiadmi 2006) identifie les cas de figures possibles : *le nom d'un étudiant peut être représenté par deux champs "prénom" et "nom" dans une source et par un seul champ "identité" dans une autre source. Nous pouvons également citer l'exemple d'un concept défini comme une classe dans une source de données et comme attribut dans une autre, etc.*

Surpasser l'hétérogénéité sémantique revient ainsi à faire communiquer les systèmes d'information via une connaissance commune, qui permet d'expliciter et de préciser le sens des données pour être interprétées correctement par différents systèmes. Cette connaissance peut être capturée, par exemple, grâce à des ontologies formelles.

1.3. La sémantique des modèles d'entreprises

Les conflits sémantiques rencontrés dans les modèles conceptuels statiques d'entreprises indiquent des problèmes d'interprétation des modèles souvent dus à la difficulté d'expliciter la sémantique métier implicite.

(Zouggar 2009) distingue deux types de problèmes sémantiques dans le domaine de la modélisation d'entreprise :

- Problèmes sémantiques concernant les langages de modélisation d'entreprise et portant sur l'ensemble des artéfacts (syntaxe concrète) qui définissent la sémantique

de chacun des langages. Dans ce cadre, par exemple, le concept de « fonction » n'a pas la même sémantique dans les langages fonctionnels définis par CIMOSA[21] que dans IDEF0[22]. En effet, le concept « fonction » dans le contexte de CIMOSA décrit l'enchaînement des opérations de la gestion de production alors que, dans IDEF0, il traite les aspects statiques d'un système.

- Problèmes sémantiques portant sur les informations conceptualisées au niveau d'un modèle d'entreprise spécifique relatif à une entreprise particulière. Dans ce contexte, par exemple, le concept « employé » n'a pas la même sémantique dans toutes les entreprises. En effet, pour une entreprise donnée, un « employé » désigne toute personne travaillant dans cette entreprise. Alors que pour une autre entreprise, un employé est toute personne n'ayant pas le statut cadre.

Nous constatons ainsi que la sémantique véhiculée par les différents modèles est plus ou moins explicite. Dans ce contexte, la difficulté d'opérer avec les divers modèles d'entreprise réside dans le fait que la majorité de ces modèles ont été élaborés par différents experts ayant chacun leur propre expérience de modélisation. Par conséquent, un processus de conceptualisation peut produire plusieurs représentations syntaxiquement différentes mais sémantiquement équivalentes.

De plus, la plupart de ces modèles proviennent généralement d'une retro-ingénierie[23] d'applications existantes, qui incluent alors diverses fonctionnalités liées à l'implémentation puisqu'ils ont été réalisés *a posteriori* et non *a priori* (Lezoche, Panetto et Aubry 2011). Ce processus de modélisation induit alors des interférences néfastes pour la compréhension de la sémantique des modèles produits.

Considérons, par exemple, l'extrait (très succinct) de deux différents modèles conceptuels représenté dans la Figure 22, selon la notation des diagrammes de classes UML. Intuitivement, nous remarquons que ces classes véhiculent la même sémantique malgré que celles-ci soient spécifiées différemment. Il s'agit, dans ce simple exemple, d'une modélisation du concept de produit et de sa propriété de poids, de deux manières syntaxiquement distinctes. Sur la droite de la Figure 22, le modèle met en évidence deux

[21] Computer Integrated Manufacturing Open System Architecture (http://www.cimosa.de/)

[22] Integration Definition for Function Modeling (http://www.idef.com/idef0.htm)

[23] La rétro-ingénierie logicielle est fréquemment appliquée aux structures de données : il s'agit, dans ce cas de figure, d'effectuer une rétro documentation des structures de données physiques peu ou mal documentées (applications vieillissantes). On essaie de reconstituer un modèle de données à partir des structures physiques des fichiers ou des tables. (Wikipédia)

classes associées *PRODUCT* et *WEIGHT*. Ce choix de modélisation peut être justifié par les contraintes d'implémentation visant à faciliter la recherche optimisée des valeurs de poids par exemple, ou par la possibilité de partager ce concept avec d'autres entités. Alors que, sur la gauche de Figure 22, le poids associé au produit est modélisé par deux attributs (valeur et unité) de la classe *PRODUCT*.

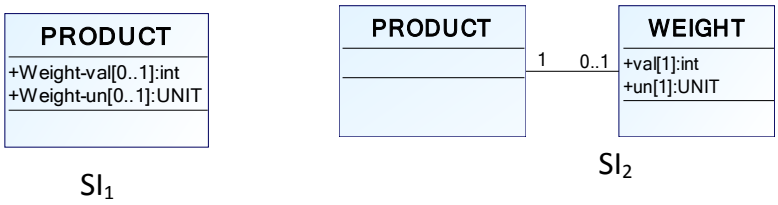


Figure 22. Deux extraits de modèles conceptuels

1.4. Problématique : Explicitation de la sémantique métier

La difficulté de faire interopérer les divers systèmes d'information d'entreprises collaboratives, à travers l'interopération de leurs modèles conceptuels, réside alors dans l'explicitation de leur sémantique. En ce sens, (Lezoche, Panetto et Aubry 2011) argumente que "Le prérequis principal pour garantir l'interopérabilité des systèmes d'information est de maximiser la quantité de la sémantique utilisée et de la rendre de plus en plus explicite (Obrst 2003), ce qui permet, par conséquent, de rendre les systèmes sémantiquement interopérables." [24]

La problématique principale de nos travaux de recherche porte donc sur l'évaluation de l'interopérabilité à travers la formalisation puis l'analyse des relations sémantiques entre ces modèles (dans le contexte de leur utilisation).

Expliciter la sémantique métier tacite bruitée par les exigences d'implémentation de ces modèles est donc nécessaire pour faciliter la formalisation des relations d'interopérabilité, et consiste en l'extraction de chaque « atome » de sémantique métier (élément de sens minimal et non décomposable) incorporé dans l'application (Yahia, Aubry et Panetto 2011).

Dans la section qui suit, nous présentons l'approche que nous adoptons pour permettre l'obtention d'un modèle conceptuel statique très détaillé – représenté sous la forme d'un diagramme de classes UML – où chaque « atome » de sémantique incorporée dans les artefacts de modèle (classes, attributs, associations, contraintes ...) est présenté avec une syntaxe concrète unifiée. Cette approche n'est pas le cœur du travail de cette thèse mais elle

[24] "The main prerequisite for achievement of interoperability of information systems is to maximise the amount of semantics which can be used and make it increasingly explicit (Obrst 2003) , and consequently, to make the systems semantically interoperable."

est le fruit d'un travail au sein de notre équipe de recherche et présenté dans (Lezoche, Panetto et Aubry 2011) et (Yahia, Lezoche, et al. 2011) dont nous présentons les résultats dans la section suivante.

2. L'approche d'explicitation de la sémantique

Lorsqu'il s'agit d'expliciter la sémantique des modèles conceptuels de deux systèmes d'information collaboratifs, afin de formaliser leur interopération, deux cas de figures peuvent se présenter :

1. les modèles conceptuels ne sont pas disponibles : dans ce cas, il faut avoir recours à une phase de conceptualisation en procédant par exemple à la rétro-ingénierie (Lezoche, Panetto et Aubry 2011) des modèles logiques implémentés. (Voir STEP 1 de la Figure 23).
2. On dispose des modèles de données conceptuels, logiques[25], physiques[26] des deux systèmes d'information. Dans ce cas, il faut :
    - Enrichir la sémantique métier véhiculée par les modèles en injectant les connaissances des experts du domaine. (Voir Etape 2 de la Figure 23).
    - Expliciter la sémantique en identifiant et en supprimant tout ce qui peut la bruiter (les données servant à faciliter l'implémentation, par exemple) puis en procédant à une transformation « fact-oriented modelling » (Yahia, Lezoche, et al. 2011) et (Yahia, Aubry et Panetto 2011) . (Voir Etape 3 de la Figure 23).

Dans cette section, nous présentons, dans un premier temps, l'approche de rétro-ingénierie permettant d'obtenir un modèle conceptuel, puis, dans un deuxième temps, nous présentons l'approche pour enrichir ce modèle conceptuel et, enfin nous présentons l'approche pour « normer » et expliciter la sémantique de ce modèle.

Le schéma de la Figure 23 résume l'ensemble des processus pour réaliser les actions précédemment listées. Ces processus permettent d'obtenir un modèle conceptuel statique explicitant la sémantique métier du Système d'Information étudié. Ces processus sont décrits dans les sections suivantes.

---

[25] Le modèle fonctionnel ou logique s'intéresse à des fonctions particulières d'un ensemble, à une vision partielle.

[26] Le modèle physique ou organique correspond à une mise en œuvre particulière du modèle et donc à une organisation physique spécifique.

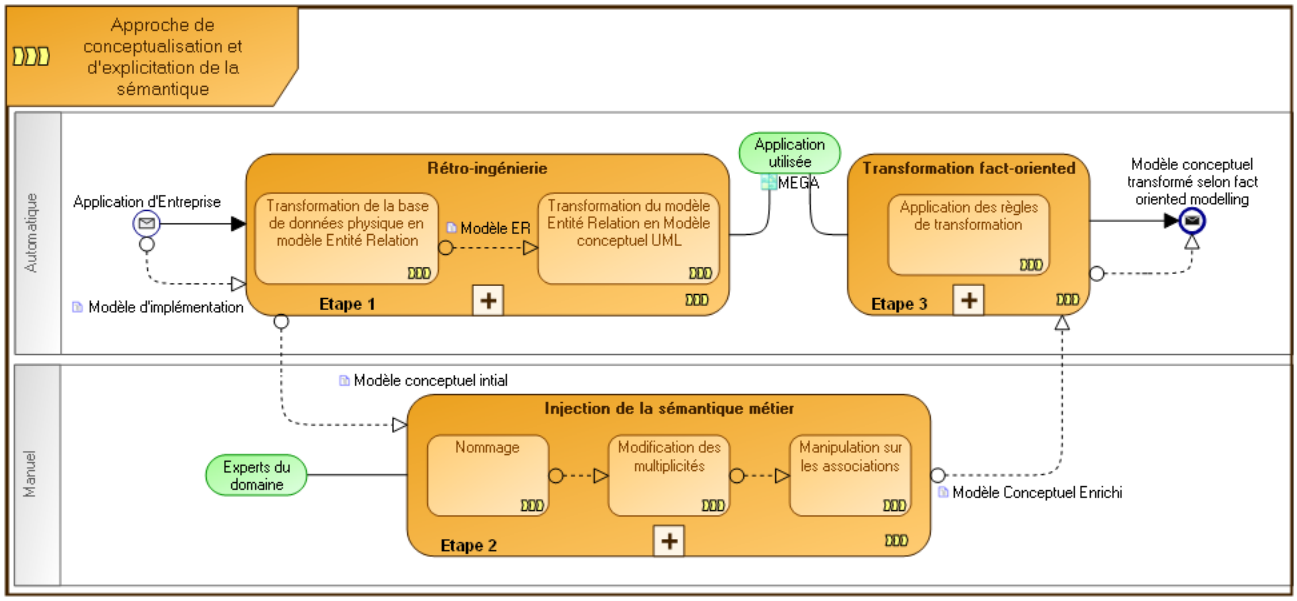


Figure 23. L'approche de conceptualisation et d'explicitation de la sémantique. Source (Lezoche, Panetto et Aubry 2011).

2.1. Etape 1 : rétro-ingénierie

Développer des modèles conceptuels consiste, tout d'abord, à spécifier les composants essentiels du système étudié ainsi que les relations entre ces composants, et à reconnaitre, ensuite, les changements possibles au niveau des composants et leurs relations qui affectent le fonctionnement du système (Engelbart 1962).

De plus, le processus de conceptualisation a été caractérisé par (Guarino 1998) comme étant un processus décisionnel, il fournit d'après (Lezoche, Panetto et Aubry 2011) « *une vue, dans laquelle la partie étudiée de la connaissance qui est souvent implicite et complexe, est réorganisée sous forme d'agrégats plus simples à représenter* »[27]

Nous pouvons disposer, en entrée du processus de conceptualisation, d'une application avec un modèle déjà implémenté, d'un modèle de données. Diverses méthodes de rétro-ingénierie parmi lesquelles celle de (Fonkam et Gray 1992) et (Chiang, Barron et Storey 1994) permettent de retro-dériver un modèle conceptuel à partir de ce type d'entrée.

Ces méthodes sont, pour la plupart, implémentées dans des outils de modélisation comme *MEGA Suite*[28] qui fournit un environnement permettant la transformation inverse de modèles relationnels en modèles conceptuels bruts.

---

[27] A "view", in which studied part of reality knowledge, usually in an implicit and complex form, is reorganised in different aggregates usually simpler to be represented

[28] http://www.mega.com/en/c/product

2.2. Etape 2 : injection de la sémantique métier

(Zouggar 2009) considère que le langage de modélisation permet d'assurer une certaine rigueur syntaxique au modèle conceptuel du système d'information réalisé, alors que la sémantique est principalement injectée par les experts du domaine. D'ailleurs, la garantie sémantique des modèles obtenus repose uniquement sur les compétences de ces experts. Conceptualiser les bonnes pratiques d'une entreprise donnée, exprimées à travers les bonnes pratiques des utilisateurs et des experts ainsi que les contraintes issues des traitements, permet d'enrichir sémantiquement les modèles conceptuels initiaux.

D'ailleurs, les utilisateurs, qui ont assimilé les particularités des systèmes d'information manipulés, sont capables d'ajouter des contraintes spécifiques dans le modèle conceptuel, pour la plupart implicitement introduites dans le modèle d'implémentation. Ceci peut être effectivement réalisé, par exemple, en renommant les concepts pour assurer leur cohérence et en redéfinissant des attributs et/ou des multiplicités des rôles d'association selon les bonnes pratiques assimilées par les parties prenantes concernées.

Considérons l'exemple illustratif formulé par (Lezoche, Panetto et Aubry 2011). Soit a_1 un attribut particulier, deux cas de figures se présentent :

1. a_1 est un attribut non-obligatoire dans le modèle conceptuel, mais les utilisateurs (dans l'entreprise) lui affecte toujours une valeur spécifique. Le modèle enrichi doit donc prendre en considération que cet attribut a_1 doit être traité comme étant obligatoire ;
2. a_1 est implémenté comme obligatoire dans le modèle conceptuel, mais en pratique, les utilisateurs ne se soucient guère de renseigner sa valeur concrète et lui attribuent une valeur factice. Dans ce cas, le modèle enrichi peut formaliser que cet attribut n'est pas obligatoire.

De la même manière, on peut ajouter des associations qui ne sont pas définies au niveau du modèle conceptuel initial mais seulement détectées à travers les pratiques des utilisateurs.

Le **modèle conceptuel enrichi** doit formaliser ainsi la sémantique métier du système d'information en prenant en considération les connaissances des parties prenantes, les bonnes pratiques de l'entreprise et les contraintes complexes existantes dans les modèles initiaux (les contraintes de cardinalités, les contraintes d'exclusion de rôles, les contraintes de spécialisation (exclusivité ou complétude)…).

2.3. Etape 3 : transformation « Fact oriented »

Pour éviter que la sémantique des modèles conceptuels étudiés soit dépendante des différents pratiques de modélisation utilisées, nous proposons de **normer** ces modèles en faisant abstraction de leurs différences syntaxiques pour se concentrer, uniquement, sur la sémantique qu'ils véhiculent, avec un niveau de granularité le plus fin possible.

Nous proposons ainsi de mettre en application les préceptes définis par l'approche « **fact-oriented modelling** » (Halpin 2007). En effet, le paradigme de modélisation « fact-oriented modelling » est une approche visant à éviter les représentations conflictuelles comme celles définies dans l'exemple de la Figure 22 de la section 1.3 (pour faciliter la lecture, nous reportons cette figure ci-dessous (Figure 24). Il remet en cause la sémantique implicite sous-jacente de n'importe quel domaine et ceci en verbalisant les faits et les règles (Halpin 2007). Les modèles résultants sont sans attribut et reposent sur l'utilisation de faits (présentant des choses réelles ou présentant les caractéristiques de ces choses réelles), ainsi que les relations entre ces faits.

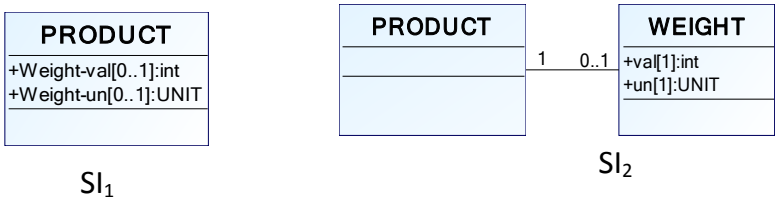


Figure 24. Deux extraits de modèles conceptuels

Le langage « NIAM (Natural-language Information Analysis Method) » proposé par (Nijssen et Halpin 1989), et sa variante « ORM[29] (Object-Role Modelling)» sont les langages les plus significatifs basés sur le paradigme de modélisation « fact-oriented modelling ». Les atouts de cette approche sont qu'elle favorise l'expressivité de la sémantique et son interprétation univoque d'une part, et facilite la verbalisation naturelle d'autre part (Halpin 2007). D'ailleurs, cette approche n'utilise pas explicitement les attributs mais fait intervenir, au lieu de cela, des concepts lexicaux (Lexical Object Type - LOT) et non-lexicaux (NOn-Lexical Object Type - NOLOT) pour spécifier les modèles produits (Halpin 2006).

(De Bo, Spyns et Meersman 2003) définissent ces concepts comme suit: « *a lexical object (LOT),* a term*, is an object in a certain reality that can be written down. LOTs always consist of letters, numbers, symbols or other characters. They can be used as names for or references to other objects. A non-lexical object (*NOLOT*),* a concept, *is an object in a certain reality that*

[29] http://www.orm.net/

cannot be written down. Non-lexical objects must be named by lexical objects or referred to by means of lexical objects."

Nous présentons dans la Figure 25, le méta-modèle que nous adoptons, pour la suite du manuscrit de thèse, et ceci conformément aux définitions des concepts lexicaux et non lexicaux.

Un concept lexical ainsi qu'un concept non-lexical sont une spécialisation du concept abstrait « Concept Atomique ». De plus, un concept non lexical est défini par la composition de plusieurs concepts lexicaux.

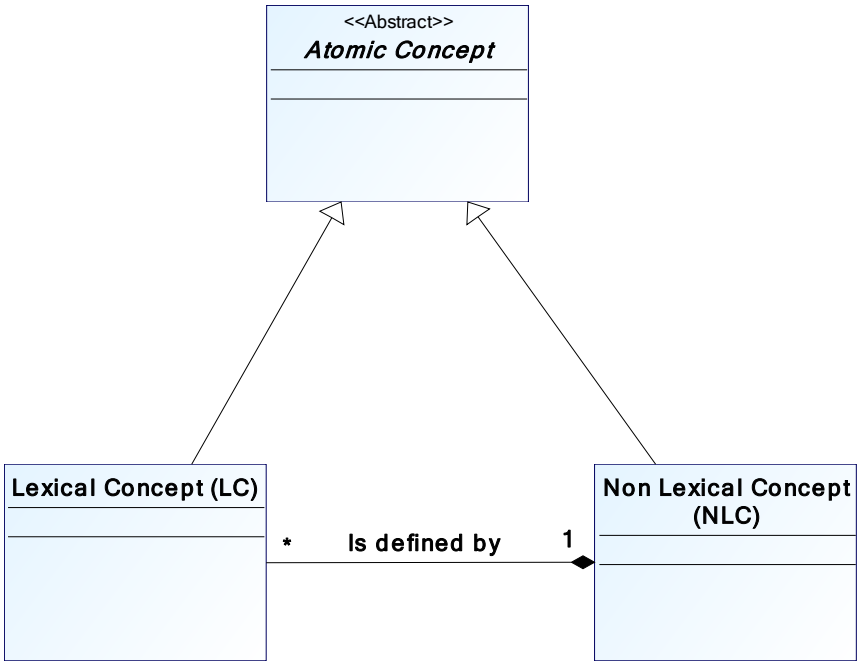


Figure 25. Méta-modèle des concepts lexicaux et non lexicaux

Pour notre travail, nous proposons ainsi d'utiliser cette approche mais en gardant une notation de type diagramme de classes UML car les modèles conceptuels d'applications d'entreprise existants dans l'industrie sont principalement représentés selon cette notation standardisée. Par ailleurs, et en prenant en compte les définitions de NIAM, nous appellerons les classes et les attributs d'UML respectivement les concepts non-lexicaux et les concepts lexicaux.

(Lezoche, Panetto et Aubry 2011) identifient, dans la Figure 26, l'ensemble des règles de transformation des artefacts du langage de classe UML (classe, attribut, classe d'association,

agrégation, composition, généralisation) selon le paradigme « fact-oriented modelling » (noté FOM). Ils proposent, de plus, une formalisation de ces règles, dans le langage de logique du premier ordre (en anglais First Order Logic, noté FOL).

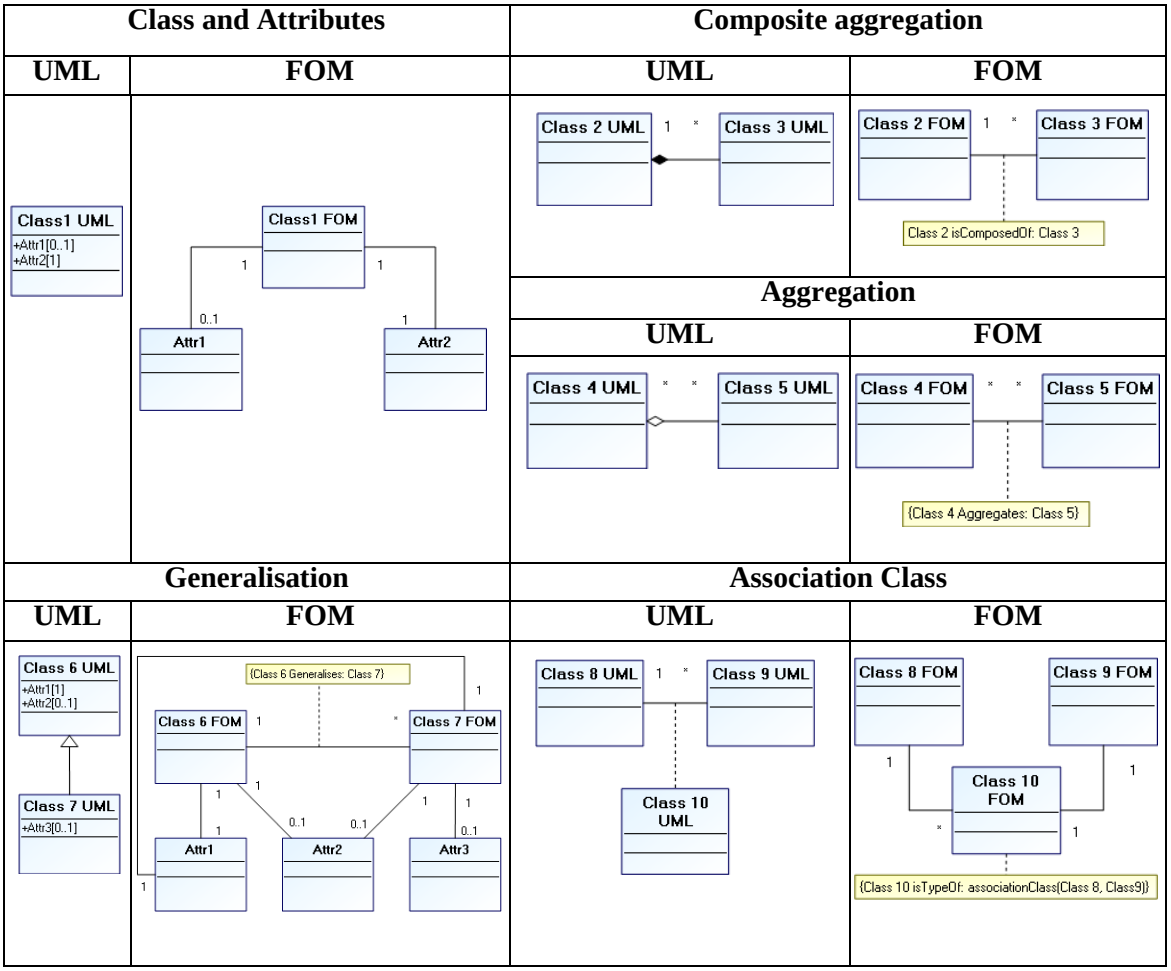
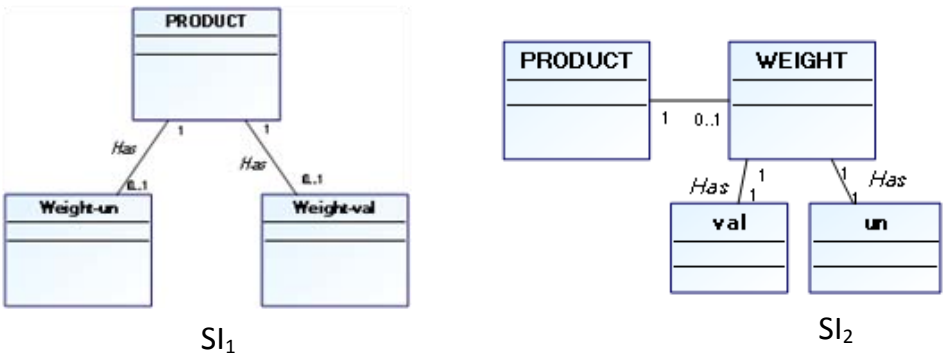


Figure 26. Les règles de transformation utilisant la syntaxe d'UML (Lezoche, Panetto et Aubry 2011)

En appliquant le paradigme « fact-oriented modelling » sur l'exemple de la Figure 24, nous obtenons alors les modèles conceptuels de la Figure 27, caractérisés par leur sémantique explicitée.



SI_1 SI_2

Figure 27. Les modèles conceptuels de la Figure 24 transformés selon le paradigme « fact-oriented modelling »

Dans nos travaux de thèse, nous considérons ces modèles enrichis comme une donnée d'entrée de notre approche d'évaluation (Chapitre 3).

3. Mise en évidence de la structure de la sémantique

3.1.Définition de la sémantique métier centrale et étendue

L'étude d'un modèle conceptuel d'un système d'information élaboré selon l'approche « fact-oriented modelling » met en évidence des concepts obligatoires (participant à des associations contraintes) et non-obligatoires (participants à des associations non contraintes). Ils expriment alors une sémantique métier du modèle qui les définit.

Les concepts obligatoires sont ceux qui amènent toute la sémantique métier nécessaire à la cohérence et la compréhension du modèle conceptuel statique. Ils comprennent tous les concepts lexicaux et non-lexicaux, associés entre eux par des rôles d'association ayant une multiplicité contrainte (1 ou 1..*). De manière duale, les concepts non-obligatoires correspondent aux concepts ayant des rôles d'association avec une multiplicité non-contrainte (0..1 ou *). Ces derniers ne font qu'enrichir la sémantique métier des modèles conceptuels produits.

Les contraintes de rôles (0..1, *, 1, 1..*) peuvent être généralisées en $(0..n, m, 1, p..q)$ avec $n, m, p, q \geq 1$ sans que cela ne remette en cause le caractère général de nos résultats.

La sémantique métier dite « centrale » d'un modèle correspond alors à la sémantique métier minimale contenue dans chaque modèle conceptuel d'un Système d'Information (SI) et formalisée par l'ensemble des concepts obligatoires et leurs associations contraintes. Cette sémantique représente l'essence du SI. La sémantique métier dite « étendue » englobe non seulement la sémantique métier « centrale » mais aussi tous les concepts et associations qui lui sont faiblement couplés (multiplicité non-contrainte).

3.2. Quelques définitions mathématiques

Nous adoptons, pour chaque modèle conceptuel d'un système d'information donné, les notations suivantes :

Définition 1. C_{SI} est l'ensemble des concepts lexicaux ou non lexicaux identifiés, il est formellement défini par :

$$\boldsymbol{C_{SI} = \{c_i | c_i \text{ est un concept lexical ou non lexical du modèle conceptuel du } SI\}}$$

Nous définissons également deux sous-ensembles comme suit : $\boldsymbol{C_{SI} = NLC_{SI} \cup LC_{SI}}$ où :

- NLC_{SI} est le sous-ensemble de C_{SI} contenant tous les concepts non lexicaux et,
- LC_{SI} est le sous-ensemble de C_{SI} contenant tous les concepts lexicaux.

Nous pouvons noter que :

$$\boldsymbol{C_{SI} = NLC_{SI} \cup LC_{SI}}$$

$$\boldsymbol{NLC_{SI} \cap LC_{SI} = \emptyset}$$

Définition 2. Rel_{SI} est l'ensemble des relations binaires identifiées entre les concepts. Il est formellement défini par :

$$\boldsymbol{Rel_{SI} = \{rel(c_i, c_j) | (c_i, c_j) \in C_{SI} \times C_{SI} \wedge c_i \text{ est associé à } c_j\}}$$

Définition 3. $Mult\left(rel(c_i, c_j)\right)$ représente la multiplicité du rôle de c_j au niveau de l'association entre les deux concepts c_i et c_j du modèle conceptuel du SI étudié.

Pour chaque $(c_i, c_j) \in C_{SI} \times C_{SI}$, si $rel(c_i, c_j)$ existe alors $Mult\left(rel(c_i, c_j)\right) \in \{*, 0..1, 1, 1..*\}$ et ceci se lit : c_i est associé à c_j dans la relation $rel(c_i, c_j)$ avec une multiplicité égale à $Mult\left(rel(c_i, c_j)\right)$.

Définition 4. MC_{SI} est le sous-ensemble de C_{SI} contenant tous les concepts obligatoires. Il est formellement défini par :

$$\boldsymbol{MC_{SI} = \left\{c_i \middle| \exists \left(c_j, rel(c_i, c_j)\right) \in C_{SI} \times Rel_{SI} \wedge Mult\left(rel(c_i, c_j)\right) \in \{1, 1..*\}\right\}}$$

Nous définissons également deux sous-ensembles comme suit : $\boldsymbol{MC_{SI} = MNLC_{SI} \cup MLC_{SI}}$ où :

- $MNLC_{SI}$ est le sous-ensemble de C_{SI} contenant tous les concepts non lexicaux obligatoires et,
- MLC_{SI} est le sous-ensemble de C_{SI} contenant tous les concepts lexicaux obligatoires.

Nous pouvons noter que :

$$\boldsymbol{MNLC_{SI} = MC_{SI} \cap NLC_{SI}}$$

$$\boldsymbol{MLC_{SI}} = \boldsymbol{MC_{SI}} \cap \boldsymbol{LC_{SI}}$$

$$\boldsymbol{MC_{SI}} = \boldsymbol{MNLC_{SI}} \cup \boldsymbol{MLC_{SI}}$$

$$\boldsymbol{MNLC_{SI}} \cap \boldsymbol{MLC_{SI}} = \emptyset$$

Définition 5 NMC_{SI} est le sous-ensemble de C_{SI} contenant tous les concepts non obligatoires. Il est formellement défini par :

$$\boldsymbol{NMC_{SI}} = \left\{ \boldsymbol{c_i} \middle| \forall \left(\boldsymbol{c_j}, \boldsymbol{rel}(\boldsymbol{c_i}, \boldsymbol{c_j}) \right) \in \boldsymbol{C_{SI}} \times \boldsymbol{Rel_{SI}}, \boldsymbol{Mult}\left(\boldsymbol{rel}(\boldsymbol{c_i}, \boldsymbol{c_j}) \right) \in \{*, \boldsymbol{0}..\boldsymbol{1}\} \right\}$$

Nous définissons également deux sous-ensembles comme suit : $\boldsymbol{NMC_{SI}} = \boldsymbol{NMNLC_{SI}} \cup \boldsymbol{NMLC_{SI}}$ où :

- $NMNLC_{SI}$ est le sous-ensemble de C_{SI} contenant tous les concepts non lexicaux non obligatoires et,
- $NMLC_{SI}$ est le sous-ensemble de C_{SI} contenant tous les concepts lexicaux non obligatoires.

Nous pouvons noter que :

$$\boldsymbol{NMNLC_{SI}} = \boldsymbol{NMC_{SI}} \cap \boldsymbol{NLC_{SI}}$$

$$\boldsymbol{NMLC_{SI}} = \boldsymbol{NMC_{SI}} \cap \boldsymbol{LC_{SI}}$$

$$\boldsymbol{NMC_{SI}} = \boldsymbol{NMNLC_{SI}} \cup \boldsymbol{NMLC_{SI}}$$

$$\boldsymbol{NMNLC_{SI}} \cap \boldsymbol{NMLC_{SI}} = \emptyset$$

Définition 6. Pour chaque concept non lexical c_j, nous définissons l'ensemble des concepts lexicaux et obligatoires qui lui sont associés par :

$$\boldsymbol{MLC}(\boldsymbol{c_j}) = \left\{ \boldsymbol{c_i} \in \boldsymbol{LC_{SI}} \middle| \left(\exists \boldsymbol{rel}(\boldsymbol{c_j}, \boldsymbol{c_i}) \in \boldsymbol{Rel_{SI}} \middle| \boldsymbol{Mult}\left(\boldsymbol{rel}(\boldsymbol{c_i}, \boldsymbol{c_j}) \right) \in \{\boldsymbol{1}, \boldsymbol{1}..*\} \right) \right\}$$

Définition 7. Pour chaque concept non lexical c_j, nous définissons l'ensemble des concepts non lexicaux et obligatoires qui lui sont associés par :

$$\boldsymbol{MNLC}(\boldsymbol{c_j}) = \left\{ \boldsymbol{c_i} \in \boldsymbol{NLC_{SI}} \middle| \left(\exists \boldsymbol{rel}(\boldsymbol{c_j}, \boldsymbol{c_i}) \in \boldsymbol{Rel_{SI}} \middle| \boldsymbol{Mult}\left(\boldsymbol{rel}(\boldsymbol{c_i}, \boldsymbol{c_j}) \right) \in \{\boldsymbol{1}, \boldsymbol{1}..*\} \right) \right\}$$

3.3. Identification des blocs sémantiques

3.3.1. Objectifs

L'étude de l'interopérabilité sémantique entre les modèles conceptuels de deux systèmes d'information nous ramène alors à examiner les approches qui permettent l'élaboration des différentes correspondances sémantiques entre les concepts des *SI*. L'ambiguïté provient principalement des multiples conflits sémantiques détaillés au niveau de la section 1.2. Par conséquence, différents concepts issus du modèle conceptuel d'un premier système d'information peuvent correspondre sémantiquement à un ou plusieurs autres concepts issus du modèle conceptuel du deuxième système d'information.

Pour surmonter ces conflits sémantiques, (Evans 2006) caractérise les différents concepts par leurs propres **potentiels sémantiques** et postule que «*La sémantique des concepts est souvent liées au contexte et est déterminée à travers la connaissance « potentielle » propre à chaque concept* »[30]

Ce potentiel sémantique, propre à chacun des concepts, met en évidence une structure conceptuelle spécifique de la connaissance.

De plus, si nous considérons la distinction entre les concepts lexicaux et non-lexicaux, nous remarquons que les concepts non-lexicaux possèdent une valeur sémantique propre, alors que les concepts lexicaux fournissent principalement une caractérisation informationnelle au concept non-lexical auquel ils sont associés. C'est pour cette raison que nous déterminons le potentiel sémantique pour chaque concept non-lexical à travers la structure du modèle conceptuel. De plus, ces concepts non-lexicaux pourraient être incorporés au niveau de plus grandes structures appelées structure composite de concepts non lexicaux (Evans 2006).

Cette structure composite définit la sémantique minimale nécessaire pour un concept non lexical c_i, formulée à travers :

i. La sémantique intrinsèque centrale définie par la sémantique de l'ensemble $\boldsymbol{MLC}(\boldsymbol{c_j})$ (**Définition 6**), et,
ii. La sémantique extrinsèque centrale définie par la sémantique de l'ensemble $\boldsymbol{MNLC}(\boldsymbol{c_j})$ (**Définition 7**)

[30]«The meaning is always contextually determined, and is selected among the knowledge 'potential' that a concept provides access to».

Nous assignons à la structure composite d'un concept non lexical (obligatoire ou non obligatoire) donné c_i, la notion de Bloc Sémantique (SB), dénoté $SB(c_i)$, et définissant la sémantique minimale nécessaire de c_i.

Formellement, $SB(c_i)$ est défini comme suit :

$$\boldsymbol{SB(c_i) = \left\{ c_i \cup MLC(c_i) \cup_{c_j \in MNLC(c_i)} SB(c_j) \right\}.}$$

De manière générale, deux blocs sémantiques $SB(c_i)$ et $SB(c_j)$ peuvent être sémantiquement équivalents (c'est-à-dire agrégeant les mêmes concepts). Nous noterons alors ces deux blocs sémantiques de manière unique comme suit : $SB(c_i, c_j)$.

À travers la définition proposée, nous notons que la notion de Bloc Sémantique est récursive. En ce sens, un Bloc Sémantique fournit, par exemple, toute la sémantique obligatoire d'un sous-système du système d'information. Nous présentons dans les sections qui suivent, le méta-modèle du Bloc Sémantique ainsi que la procédure de construction du Bloc Sémantique illustrée par un exemple explicatif.

3.3.2. Méta-modèle de l'architecture du Bloc Sémantique

Dans cette section, nous proposons de formaliser l'architecture du Bloc Sémantique à travers le méta-modèle représenté sur la Figure 28 . Ce méta-modèle est créé sur la base du pattern composite (Gamma, et al. 1995) et complète le méta-modèle de la Figure 25. L'objectif de ce méta-modèle est d'intégrer tous ses constituants au niveau d'une arborescence permettant de présenter une ou plusieurs hiérarchies d'objets.

Un Bloc Sémantique est une spécialisation du concept abstrait « Concept ». Il résulte que sa sémantique intrinsèque subsume la sémantique d'un ensemble formé par un ou plusieurs « Concept » de niveau inférieur. Le Bloc Système (BS) représente le dernier niveau issu de l'agrégation de l'ensemble des Blocs Sémantiques.

Un Bloc Sémantique définit la sémantique nécessaire et minimale d'un ou plusieurs concepts non-lexicaux tout en respectant la contrainte qui impose que ces concepts non lexicaux

appartiennent forcément à la même composante fortement connexe[31]. De plus, un Bloc Sémantique peut être relatif à un ou plusieurs concepts.

De plus, la sémantique d'un ou plusieurs « concepts », qu'ils soient des concepts non-lexicaux ou des concepts lexicaux, est agrégée dans un ou plusieurs Blocs Sémantiques.

Ceci est traduit par la définition formelle que nous avons donnée pour les Blocs Sémantiques ($SB(c_i) = \{c_i \cup MLC(c_i) \cup_{c_j \in MNLC(c_i)} SB(c_j)\}$) et donc par le fait qu'un bloc sémantique est une agrégation de concepts non-lexicaux et uniquement des concepts lexicaux qui lui sont obligatoirement associés.

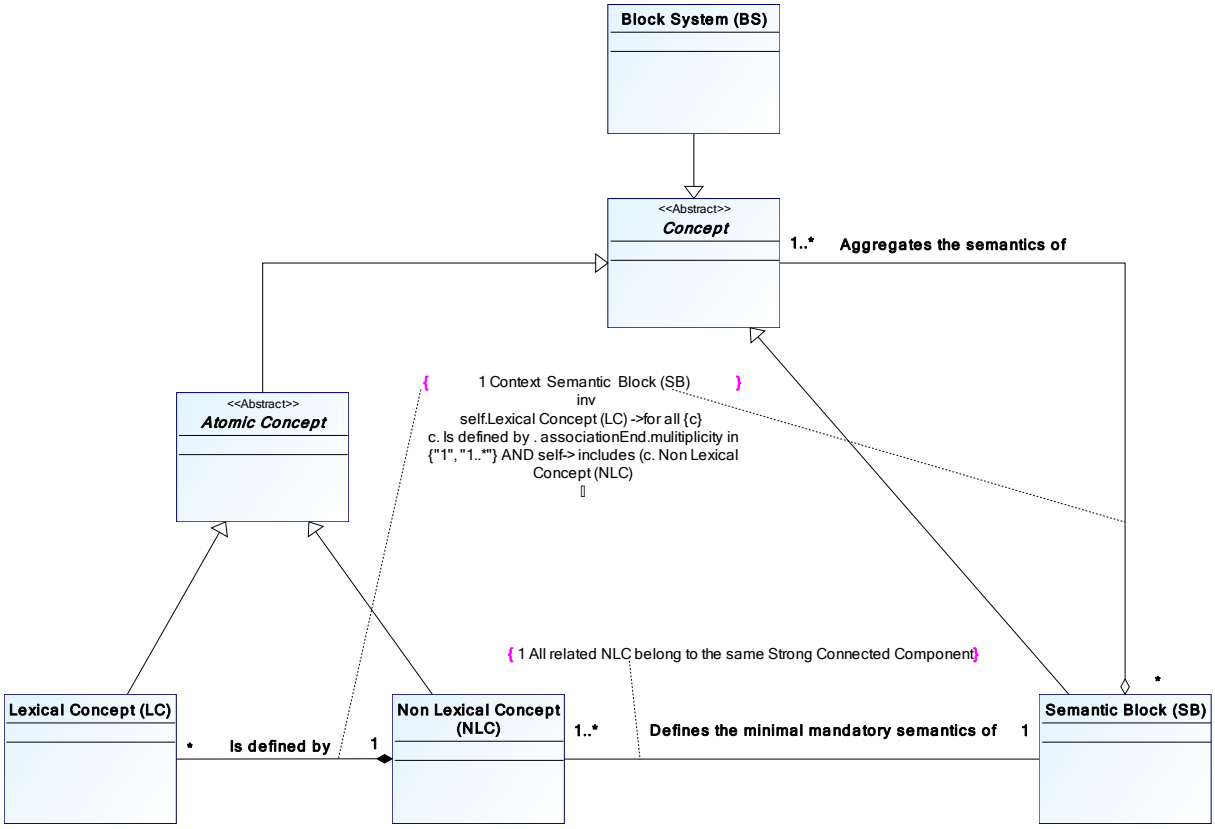


Figure 28. Méta-modèle de l'architecture du bloc sémantique

[31] En théorie des graphes, une composante fortement connexe d'un graphe orienté G est un sous-graphe maximal de G tel que pour toute paire de sommets u et v dans ce sous-graphe, il existe un chemin de u à v et un chemin de v à u (source Wikipedia).

3.3.3. Construction des blocs sémantiques

Considérons le modèle conceptuel de la Figure 29 et sa transformation selon l'approche « fact-oriented modelling » (voir Figure 30). Nous cherchons à construire le bloc sémantique du concept $C2$.

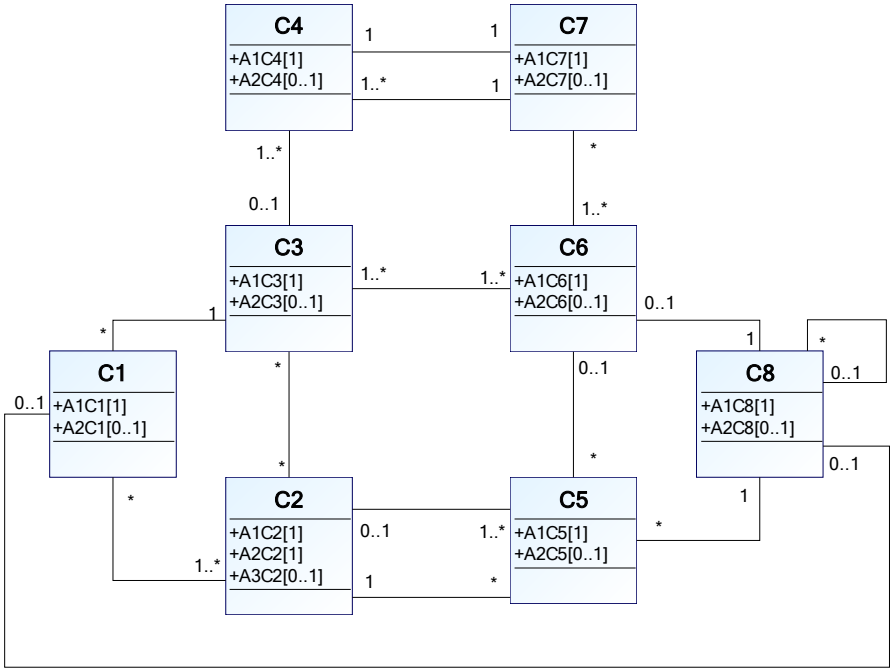


Figure 29. Un modèle conceptuel

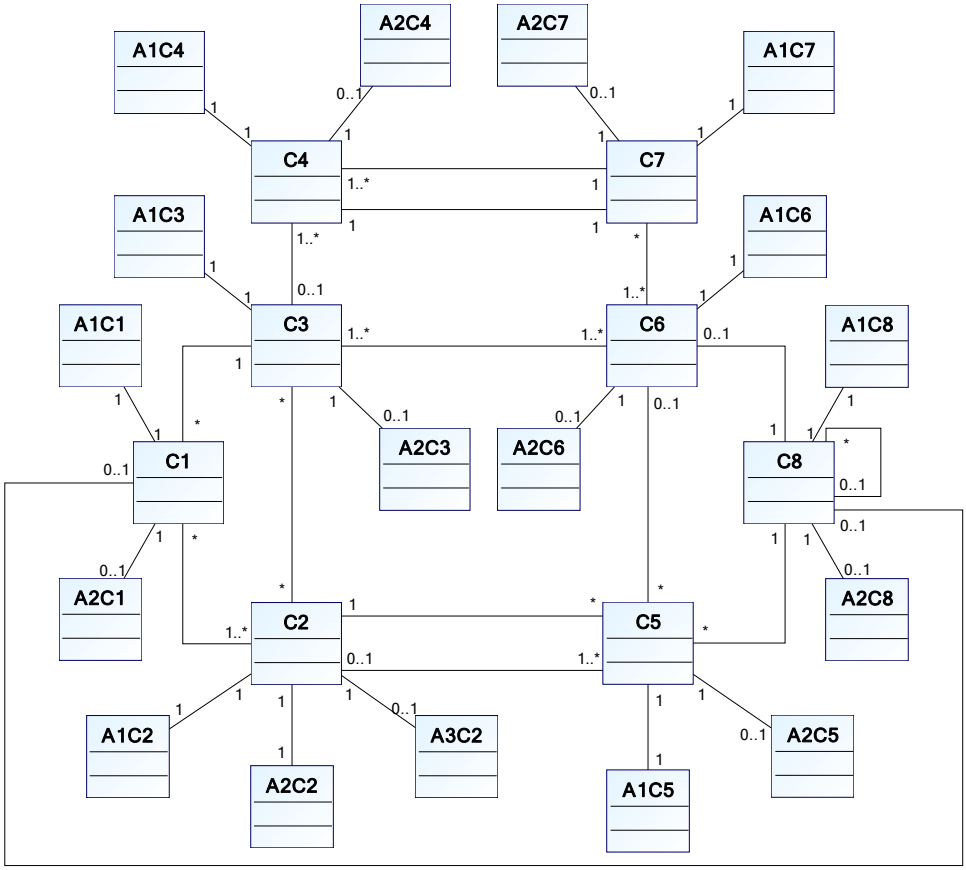


Figure 30. Le modèle conceptuel de la Figure 29 transformé selon le paradigme « fact-oriented modelling »

La sémantique intrinsèque centrale de $C2$ est définie par la sémantique des concepts lexicaux obligatoires qui lui sont associés $A1C2$ et $A2C2$. De plus, une instance donnée du concept non lexical $C2$ existe si seulement si elle est associée à au moins une instance du concept non lexical $C5$. Cela signifie que $C5$ est obligatoire pour exprimer la sémantique de $C2$. Par ailleurs, étant donné que les rôles de $C1$ et $C3$ dans leur association avec $C2$ ont une multiplicité minimale égale à 0, l'existence de n'importe quelle instance de $C2$ n'est pas conditionnée par l'existence d'une instance de $C1$ et $C3$. Finalement, $SB(C2) = \{C2 \cup \{A1C2, A2C2\} \cup SB(C5)\}$. (Définition de la section 3.3.1)

Récursivement, nous pouvons montrer que la sémantique intrinsèque centrale de $C5$ est définie par la sémantique de $A1C5$ et une instance donnée de $C5$ existe si seulement si elle est associée à exactement une instance de $C8$ et exactement une instance de $C2$. Donc, $SB(C5) = \{C5 \cup \{A1C5\} \cup SB(C2) \cup SB(C8)\}$.

En procédant au même raisonnement, nous pouvons démontrer que $\mathrm{SB}(C8) = \{C8 \cup \{\mathrm{A1C8}\}\}$. Ce qui signifie que $SB(C2) = \{\{C2, C5, C8\} \cup \{\mathrm{A1C2}, \mathrm{A2C2}\} \cup \{\mathrm{A1C5}\} \cup \{\mathrm{A1C8}\}\}$.

Si on considère un concept non lexical c_i , son Bloc Sémantique va effectivement contenir tous les concepts non-lexicaux qui doivent être instanciés pour assurer l'existence d'une de ces instances, en plus des concepts lexicaux obligatoires qui lui sont associés.

Pour simplifier l'identification du Bloc Sémantique d'un concept particulier c_i, nous pouvons procéder, en premier lieu, à la détermination de l'ensemble des concepts non-lexicaux qui lui sont associés. Les concepts lexicaux obligatoires sont ajoutés, en deuxième lieu. Ce qui implique que l'identification du bloc sémantique du concept c_i consiste à déterminer $SB(c_i) = SB_c(c_i) \cup SB_a(c_i)$ tel que :

- $SB_c(c_i) = \left\{\{c_i\} \cup_{c_j \in MNLC(c_i)} SB_c(c_j)\right\}$ et,
- $SB_a(c_i) = \{MLC(c_j) | c_j \in SB_c(c_i)\}$

Par exemple, $SB_c(C2) = \{C2, C5, C8\}$ et $SB_a(C2) = \{A1C2, A2C2, A1C5, A1C8\}$.

3.3.4. Utilisation de la théorie des graphes pour construire $SB_c(c_i)$

Pour faciliter la construction des blocs sémantiques, nous proposons, pour chaque $c_i \in NLC_{SI}$, d'identifier l'ensemble associé $SB_c(c_i)$ en utilisant la théorie des graphes et ses outils mathématiques.

Nous proposons tout d'abord de définir un graphe des dépendances sémantiques associé à un modèle conceptuel donné. Ce graphe des dépendances sémantiques est un digraphe $G = (V, E)$ où V est l'ensemble des sommets et E est l'ensemble des paires ordonnées de sommets, appelées aussi des arcs. Chaque sommet de V représente un concept non-lexical du modèle conceptuel. Chaque arc de E est construit au niveau du modèle conceptuel comme suit : l'arc (c_i, c_j) existe si (i) il y a une association entre c_i et c_j dans le modèle conceptuel et (ii) tout en considérant l'association entre c_i et c_j , la multiplicité minimale du rôle de c_j est égale à 1 $\left(c_j \in MNLC(c_i)\right)$. Cela signifie que l'arc (c_i, c_j) tel qu'il est défini représente le fait que c_j est obligatoire pour exprimer la sémantique de c_i.

La Figure 31 montre le graphe des dépendances sémantiques associé au modèle conceptuel de la Figure 30.

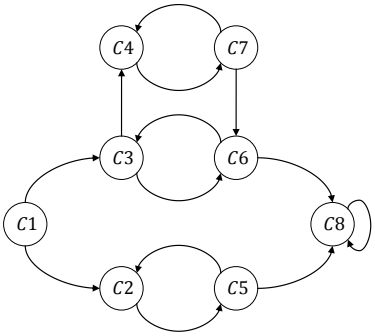


Figure 31. Le graphe des dépendances sémantiques associé au modèle conceptuel de la Figure 30.

3.3.5. Quelques propriétés

Théorème 1. Étant donné deux concepts non lexicaux c_i et c_j, c_j appartient à $SB_c(c_i)$ si et seulement s'il existe un chemin de c_i à c_j.

Preuve. Considérons le modèle conceptuel de la Figure 30. Pour construire l'ensemble $SB_c(c_i)$ associé au concept c_i, nous considérons, tout d'abord, ce concept comme étant le point de départ et la racine du graphe des dépendances sémantiques. Dans un premier temps, nous pouvons ajouter dans $SB_c(c_i)$ tous les concepts non lexicaux c_{1k} qui doivent être instanciés pour assurer l'existence de n'importe quelle instance de c_i, c'est-à-dire tous les concepts non lexicaux c_{1k} tel qu'il y a une association entre c_i et c_{1k} dans le modèle conceptuel et tel que la multiplicité minimale du rôle de c_{1k} est égale à 1. C'est la définition exacte de tous les successeurs de c_i dans le graphe des dépendances sémantiques. Notons aussi que, par définition, il existe un chemin du concept c_i aux concepts c_{1k}. Ensuite par itération, les nouveaux concepts non lexicaux c_{2k} qui peuvent être rajoutés à $SB_c(c_i)$, sont les successeurs des premiers concepts c_{1k}. Pour les successeurs des concepts c_{1k}, il existe là aussi un chemin du concept c_i aux concepts c_{2k} (le chemin de c_i à c_{1k} plus l'arc (c_{1k}, c_{2k})). Finalement l'ensemble $SB_c(c_i)$ associé à c_i contient exactement tous les concepts non lexicaux c_j tel qu'il existe un chemin de c_i à c_j. ■

Théorème 2. Étant donné deux concepts non lexicaux c_1 et c_2, si c_2 appartient à $SB_c(c_1)$ alors $SB_c(c_2)$ est inclus dans $SB_c(c_1)$.

Preuve. Si c_2 appartient à $SB_c(c_1)$ alors ceci signifie qu'il existe un chemin de c_1 à c_2 (voir théorème 1). Considérons maintenant un concept non lexical particulier de $SB_c(c_2)$ noté c. Par définition de $SB_c(c_2)$, il existe un chemin de c_2 à c donc, il existe un chemin de c_1 à c (le chemin de c_1 à c_2 plus le chemin de c_2 à c). Cela signifie que c est dans $SB_c(c_1)$. Finalement $SB_c(c_2) \subseteq SB_c(c_1)$. ■

Théorème 3. Tous les concepts qui sont dans le même cycle du graphe des dépendances sémantiques sont associés au même et unique ensemble de type SB_c.

Preuve. Un cycle est un chemin fermé. Considérons deux concepts non lexicaux particuliers, notés c_i et c_j, et appartenant à un cycle donné. Il existe alors un chemin de c_i à c_j. Cela signifie que c_j est contenu dans $SB_c(c_i)$. D'après le théorème 2, nous pouvons aussi démontrer que $SB_c(c_j) \subseteq SB_c(c_i)$. De plus, il y a un chemin de c_j à c_i. Cela signifie que c_i est contenu dans $SB_c(c_j)$. D'après le théorème 2, ceci signifie que $SB_c(c_j) \supseteq SB_c(c_i)$. Finalement, nous trouvons que $SB_c(c_j) = SB_c(c_i)$. ■

Pour chaque cycle du graphe des dépendances sémantiques, le théorème 3 implique qu'il existe un seul ensemble $SB_c(c_i)$ associé à tous les concepts non lexicaux qui sont dans le même cycle. Ces concepts appartiennent alors à des composantes fortement connexes[32] du graphe des dépendances sémantiques. Ainsi il y a un seul ensemble $SB_c(c_i)$ par composante fortement connexe du graphe des dépendances sémantiques.

3.3.6. Procédure de construction des blocs sémantiques

L'application des théorèmes 1, 2 et 3, nous permet d'établir une procédure automatisable d'élaboration de tous les Blocs Sémantiques d'un modèle conceptuel donné :

- **i.** Élaboration du graphe des dépendances sémantiques
- **ii.** Élaboration du graphe des composantes fortement connexes en se basant sur le graphe des dépendances sémantiques
- **iii.** Élaboration de l'ensemble SB_c associé à chacune des composantes fortement connexes
- **iv.** Élaboration du Bloc Sémantique SB_a en rajoutant tous les concepts lexicaux obligatoires associés à tous les concepts non lexicaux de SB_c.
- **v.** Élaboration du Bloc Sémantique $SB = SB_c \cup SB_a$

Ces étapes sont détaillées comme suit :

1. Élaboration du graphe des dépendances sémantiques

En appliquant le théorème 1, le Bloc Sémantique du concept non lexical c_i contient tous les concepts non lexicaux c_j (et tous les concepts lexicaux obligatoires qui lui sont associés) tel

[32] En théorie des graphes, une composante fortement connexe d'un graphe orienté G est un sous-graphe maximal de G tel que pour toute paire de sommets u et v dans ce sous-graphe, il existe un chemin de u à v et un chemin de v à u (source Wikipedia).

qu'il existe un chemin de c_i à c_j au niveau du graphe des dépendances sémantiques. Ce graphe peut être facilement obtenu en considérant chaque association entre les concepts c_i et c_j et en construisant, par la suite, les arcs de c_i à c_j si la multiplicité minimale du rôle de c_j dans cette association est égale à 1.

2. Élaboration du graphe des composantes fortement connexes

Le théorème 3 implique, que pour construire les Blocs Sémantiques, nous pouvons considérer un seul concept de chaque composante fortement connexe (étant donné que les autres concepts de la même composante fortement connexe ont le même Bloc Sémantique). Ainsi nous pouvons simplifier le graphe des dépendances sémantiques en ne préservant que les composantes fortement connexes. Dans ce graphe, il existe un arc d'une composante fortement connexe $SCC1$ à une seconde composante fortement connexe $SCC2$, s'il existe un arc allant d'un concept de $SCC1$ à un autre concept de $SCC2$.

L'identification de toutes les composantes fortement connexes d'un graphe est un problème facile qui peut être résolu avec l'algorithme polynômial de Kosaraju-Sharir présenté dans (Sharir 1981).

On donne au niveau de la Figure 32, le graphe des composantes fortement connexes associé au graphe des dépendances sémantiques de la Figure 30. Sur ce graphe, les composantes fortement connexes sont définies comme suit : $SCC1 = \{C1\}, SCC2 = \{C2, C5\}$, $SCC3 = \{C3, C4, C6, C7\}$ et $SCC4 = \{C8\}$.

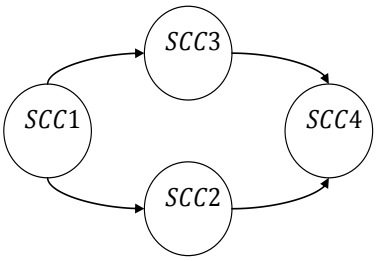


Figure 32. Le graphe des composantes fortement connexes associé au graphe des dépendances sémantiques de la Figure 30

3. Élaboration de l'ensemble SB_c associé à chacune des composantes fortement connexes

Nous proposons deux algorithmes pour construire la totalité des Blocs Sémantiques associés à chacune des composantes fortement connexes (voir Algorithmes 1 et 2). L'algorithme *BuildSemBlocks* (Algorithme 1) est appliqué au graphe des composantes fortement connexes (noté G_{SCC}). Il appelle l'algorithme $BuildSB$ (Algorithme 2) qui s'applique itérativement à chaque composante fortement connexe.

En appliquant l'algorithme $BuildSemBlocks(G_{SCC})$ au graphe de la Figure 30, nous obtenons les Blocs Sémantiques suivants :

- $SB_c(SCC1) = SCC1 \cup SCC2 \cup SCC3 \cup SCC4$,
- $SB_c(SCC2) = SCC2 \cup SCC4$,
- $SB_c(SCC3) = SCC3 \cup SCC4$ et,
- $SB_c(SCC4) = SCC4$.

Finalement, en remplaçant les composantes fortement connexes par leurs contenus, nous obtenons les blocs sémantiques suivants :

- $SB_c(C1) = \{C1, C2, C3, C4, C5, C6, C7, C8\}$,
- $SB_c(C2, C5) = \{C2, C5, C8\}$,
- $SB_c(C3, C4, C6, C7) = \{C3, C4, C6, C7, C8\}$ et
- $SB_c(C8) = \{C8\}$.

Algorithme $BuildSemBlocks(G_{SCC})$

[Initialisation]
L: Liste des composantes fortement connexes de G_{SCC}
For each $SCC \in L$ **Do**
  $color(SCC) = -1$
  [color est un indicateur qui définit si un sommet SCC est déjà visité ou pas]
  [-1 signifie n'est pas encore visité]
  [0 signifie est en train d'être visité]
  [+1 signifie a déjà été visité]
Next SCC
For each $SCC \in L$ **Do**
  If $color(SCC) = -1$ **Then**
    [élaboration des blocs sémantiques associés aux SCC]
    $BuildSB(SCC)$
  EndIf
Next SCC
Return

Algorithme 1. L'algorithme BuildSemBlocks

Algorithm $BuildSB(SCC)$

[Initialisation]
$SB(SCC) = SCC$ *[Le Bloc Sémantique associé à SCC qui contient initialement tous les concepts de SCC]*
$color(SCC) = 0$ *[SCC est en train d'être visté]*
[élaboration]
[utilisation du théorème 1]
For each SCC' successor from SCC in G_{SCC} **Do**
If $color(SCC') = -1$ **Then**
[élaboration du bloc sémantique associé à SCC']
$BuildSB(SCC')$
EndIf
[utilisation du théorème 2]
$SB(SCC) = SB(SCC) \cup SB(SCC')$
Next SCC' successor from SCC in G_{SCC}
Return $SB(SCC)$

Algorithme 2. L'algorithme BuildSB

4. *Élaboration du Bloc Sémantique SB_a associé à chacune des composantes fortement connexes*

Le Bloc Sémantique SB_a contient l'ensemble des concepts lexicaux obligatoires associés aux concepts non lexicaux contenus dans SB_c. En appliquant cette définition sur l'exemple de la Figure 30 , nous obtenons :

- $SB_a(C1) = \{A1C1, A1C2, A2C2, A1C3, A1C4, A1C5, A1C6, A1C7, A1C8\}$,
- $SB_a(C2, C5) = \{A1C2, A2C2, A1C5, A1C8\}$,
- $SB_a(C3, C4, C6, C7) = \{A1C3, A1C4, A1C6, A1C7, A1C8\}$ and
- $SB_a(C8) = \{A1C8\}$.

5. *Élaboration du Bloc Sémantique SB*

Le Bloc Sémantique SB regroupe les éléments de SB_a et SB_c. Les Blocs Sémantiques du modèle conceptuel de la Figure 30 sont définis comme suit :

- $SB(C1) =$
  $\{C1, C2, C3, C4, C5, C6, C7, C8\} \cup$
  $\{A1C1, A1C2, A2C2, A1C3, A1C4, A1C5, A1C6, A1C7, A1C8\}$
- $SB(C2, C5) = \{C2, C5, C8\} \cup \{A1C2, A2C2, A1C5, A1C8\}$,
- $SB(C3, C4, C6, C7) = \{C3, C4, C6, C7, C8\} \cup \{A1C3, A1C4, A1C6, A1C7, A1C8\}$ et,
- $SB(C8) = \{C8\} \cup \{A1C8\}$.

3.3.7. Élaboration automatique des blocs sémantiques

Dans cette partie, nous présentons l'outil permettant d'automatiser l'élaboration de l'ensemble des Blocs Sémantiques pour n'importe quel modèle conceptuel d'un *SI*. En effet, les procédures présentées au niveau de la section 3.3.6 ont été mise en œuvre à l'aide de l'outil *MEGA Suite*[33]. *Cet outil est organisé autour d'un référentiel commun, permettant de conduire des projets variés tels que l'analyse des processus, la cartographie applicative et la conception des systèmes.*

Par ailleurs, *MEGA Suite* supporte les spécifications d'UML, ce qui permet de représenter les modèles conceptuels étudiés. De plus, *MEGA Suite* offre un outillage permettant d'implémenter l'algorithme d'élaboration des blocs sémantiques par la programmation de scripts ayant directement accès aux concepts modélisés par l'intermédiaire de leur meta-modèle. Le Bloc Sémantique est alors conceptualisé comme un stéréotype de paquetage UML tandis que les concepts lexicaux et non-lexicaux sont conceptualisés comme des stéréotypes de classes UML.

La Figure 33 présente un extrait du résultat de l'application de l'algorithme sur le modèle conceptuel de la Figure 30. Cette figure montre le Bloc Sémantique $SB_c(C2, C5)$ noté $SB(2)$ (représenté comme un paquetage UML) et associé à $C2$ et $C5$ et incluant le concept $C8$. La Figure 34 montre le sous-modèle formalisant la sémantique entière de $SB(C2, C5)$. Ce sous-modèle est extrait du modèle conceptuel complet de la Figure 30, obtenu en conservant, uniquement, les concepts contenus dans $SB(C2, C5)$ ainsi que leurs associations.

[33] http://www.mega.com/fr/c/product/p/product-overview

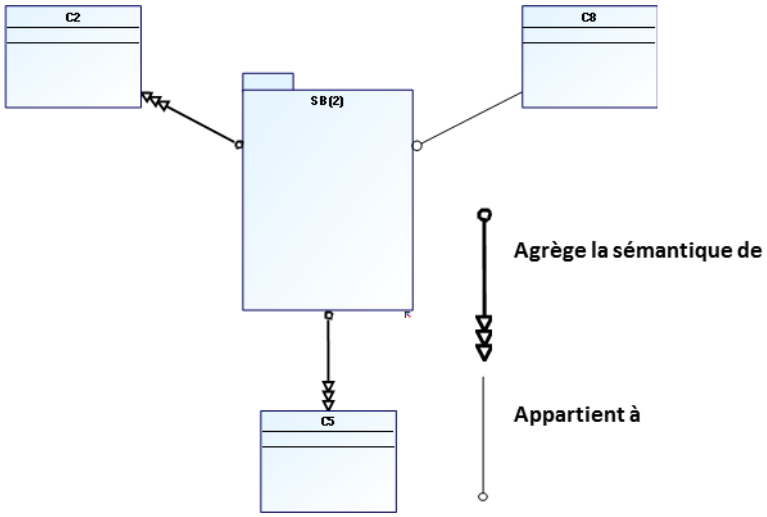


Figure 33. Le Bloc Sémantique $SB(2) = SB_c(\mathrm{C2}, \mathrm{C5})$ du modèle conceptuel de la Figure 30

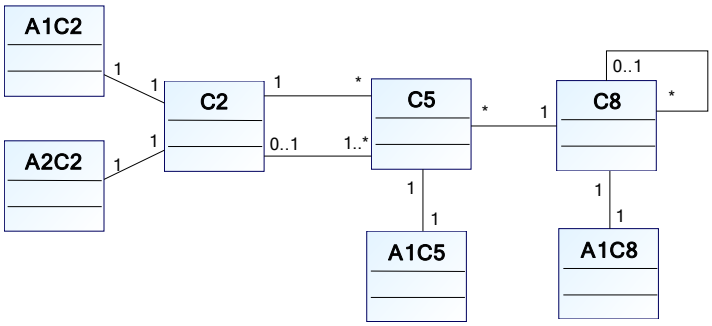


Figure 34. Extrait du modèle conceptuel formalisant la sémantique de $\mathrm{SB}(\mathrm{C2}, \mathrm{C5})$

4. Conclusion

Nous avons proposé une approche pour expliciter la sémantique implicite des modèles conceptuels des systèmes d'entreprises collaboratives à travers la « normation » de ces modèles conceptuels enrichis pour aboutir à des modèles construits selon la perspective « fact-oriented modelling ». C'est une étape primordiale pour permettre la formalisation des relations sémantiques et donc le développement de l'approche d'évaluation de l'interopérabilité sémantique que nous proposons dans le prochain chapitre.

Par ailleurs, la structuration de la sémantique à travers l'identification des blocs sémantiques permet de faciliter l'évaluation de l'interopérabilité partielle à travers l'évaluation des sous-systèmes, eux-mêmes modélisés sous la forme d'un Bloc Sémantique, éventuellement récursif.

Chapitre 3 : Formalisation et évaluation de l'interopérabilité sémantique

Introduction

Dans le chapitre 2, nous avons présenté une approche pour analyser la sémantique des modèles conceptuels des systèmes d'information devant interopérer dans le cadre des entreprises collaboratives afin de faciliter, en premier lieu, l'explicitation de la sémantique implicite, permettant ainsi d'obtenir des modèles conceptuels normés et enrichis. Nous avons également proposé une approche de structuration de cette sémantique sous forme de blocs sémantiques.

Nous proposons, dans ce troisième chapitre, une formalisation mathématique des relations sémantiques entre les différents concepts de chacun des systèmes d'information et une approche d'évaluation de l'interopérabilité se basant sur les relations sémantiques identifiées (voir Figure 35).

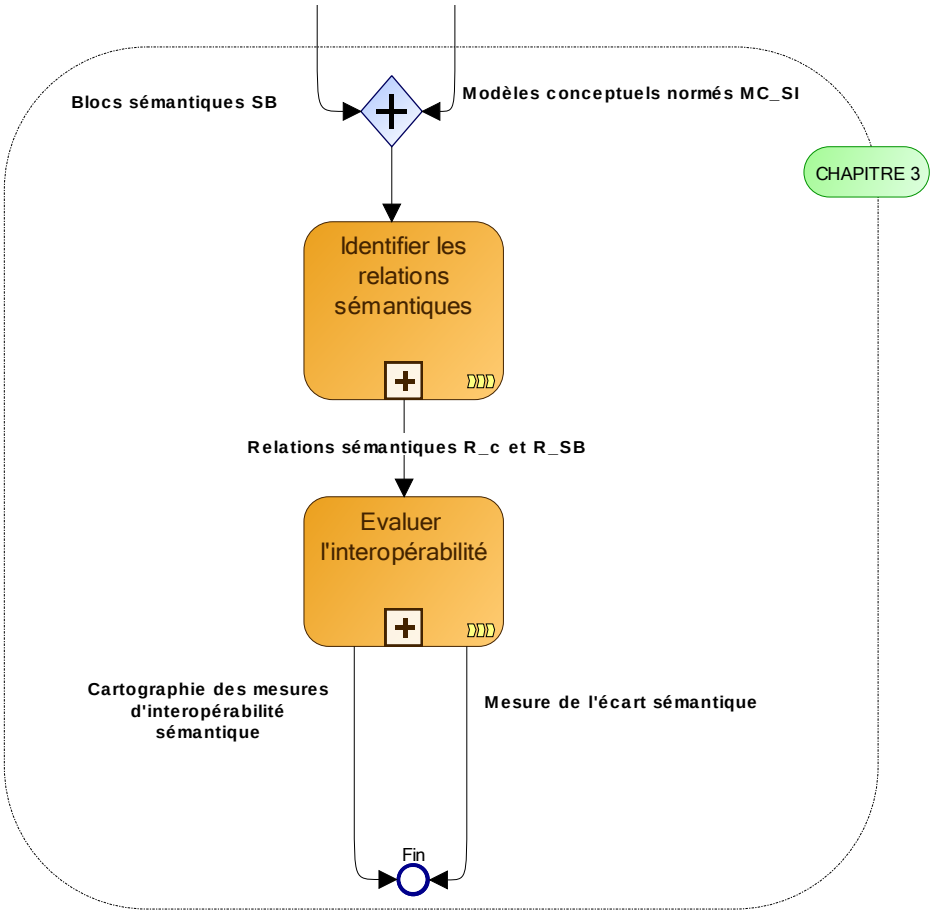


Figure 35. Structure du chapitre 3

Nous présentons, en première partie de ce chapitre, une représentation mathématique des relations sémantiques afin de caractériser l'interopérabilité des systèmes d'informations. Cette approche de formalisation de l'ensemble des relations se base principalement sur l'analyse des modèles conceptuels enrichis et normés, et bénéficie des apports de la théorie des ensembles ainsi que des diverses approches de mise en correspondance sémantique des concepts.

Nous proposons, dans une deuxième partie, une formalisation de métriques permettant d'évaluer quantitativement et qualitativement, le degré d'interopérabilité (ou de non-interopérabilité) entre les modèles conceptuels des systèmes d'information d'entreprises dont l'ensemble des concepts est noté CSI. Cette approche permet de détecter et d'évaluer l'écart sémantique et de qualifier les effets de cet écart sur l'interopération. Cette approche repose sur l'identification de la configuration, parmi celles présentées dans la Figure 36, dans laquelle évoluent les systèmes d'information étudiés.

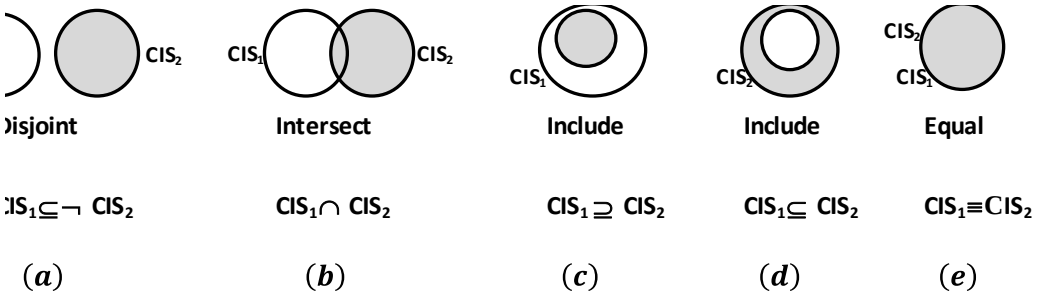


Figure 36. Les différentes configurations de l'écart sémantique entre l'ensemble des concepts des systèmes d'information SI_1 et SI_2 respectivement notés CSI_1 et CSI_2

L'approche d'évaluation est complètement basée sur l'ensemble des relations sémantiques identifiées par un expert, et formalisées dans la première partie de ce chapitre. Elle met en évidence les différentes propriétés de l'interopérabilité sémantique des systèmes étudiés, auxquelles nous associons des métriques formelles.

Ces métriques permettent à une entreprise donnée d'évaluer la capacité d'un de ces systèmes d'information à interopérer avec un autre système d'information, et donc de prévoir les éventuels problèmes avant la mise en place d'un partenariat. Ceci facilite ainsi l'identification et la spécification de l'ensemble des améliorations nécessaires à mettre en place pour atteindre un degré d'interopérabilité désiré.

Nous présentons, dans une troisième partie, l'apport de la définition des blocs sémantiques sur l'évaluation de l'interopérabilité partielle des systèmes d'information d'entreprises. En effet, les blocs sémantiques favorisent cette évaluation à travers l'évaluation de l'interopérabilité entre les sous-systèmes associés à chaque bloc sémantique selon différents niveaux de granularité.

1. Formalisation des relations sémantiques

1.1. Notre proposition de formalisation

L'approche adoptée pour formaliser les relations d'interopérabilité sémantique a, comme donnée d'entrée, les modèles conceptuels normés et enrichis par les experts du domaine obtenus par exemple à la suite de l'approche présentée dans le chapitre 2. Cette formalisation repose principalement sur des fonctions mathématiques ensemblistes et consiste à mettre en correspondance uniquement les concepts des deux systèmes d'information étudiés.

1. Formalisation des propriétés de l'interopérabilité de SI_1 vers SI_2

Nous rappelons tout d'abord la définition de l'interopérabilité déjà présentée dans le chapitre 1 ainsi que l'ensemble des propriétés qui en avaient été déduites conformément à la Figure 37 :

Soient SI_1 et SI_2, deux systèmes d'information devant interopérer, au moins partiellement, dans le cadre d'une collaboration d'entreprises.

(P1) SI_1 est capable d'échanger des informations avec SI_2,

(P2) SI_2 comprend une partie au moins de la sémantique des informations échangées et,

(P3) SI_2 exploite convenablement les informations échangées pour réaliser sa mission.

Rappelons que nous considérons que la propriété **(P1)** est satisfaite : il existe ainsi des interfaces techniques assurant l'interopérabilité technique.

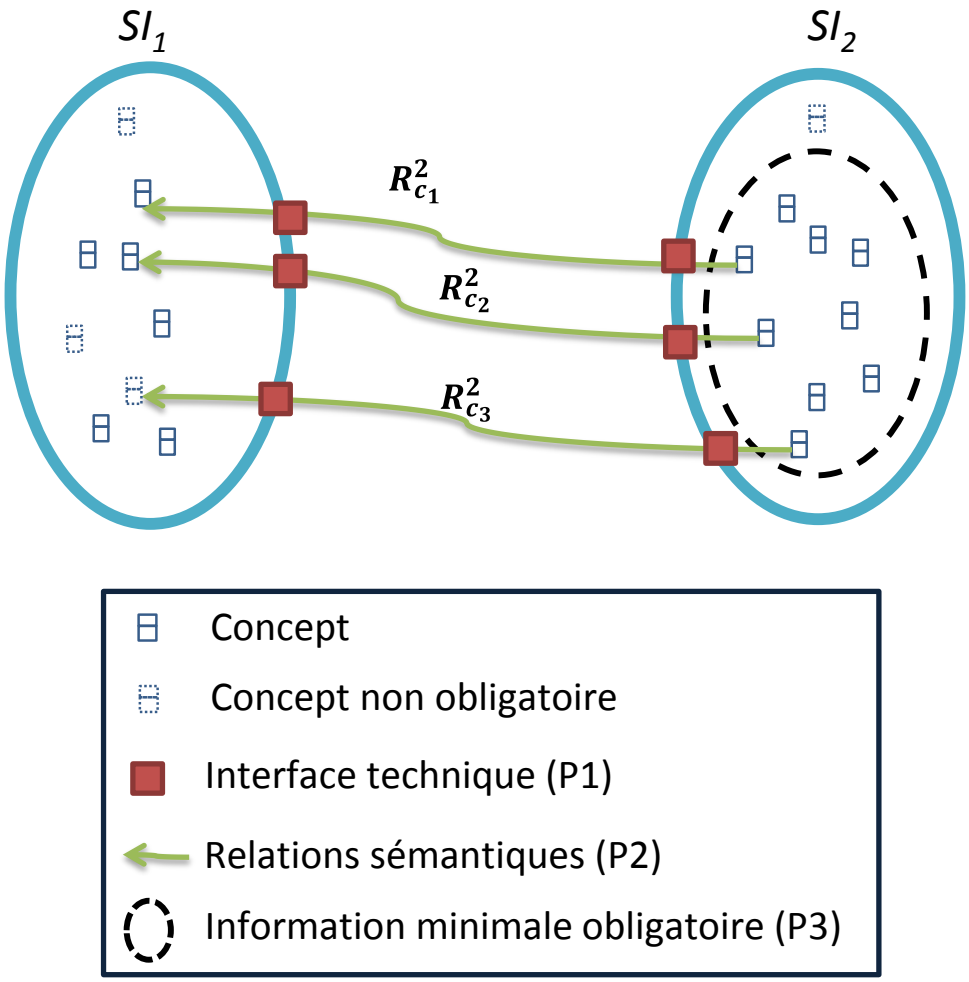


Figure 37. Propriétés de l'interopération

Formellement, **(P2)** et **(P3)** sont satisfaites si:

$$\forall\, c_i^2 \in \boldsymbol{MC_{SI_2}}, \exists \left(c_{q_1}^1, \dots, c_{q_p}^1\right) \in \left(\boldsymbol{C_{SI_1}}\right)^p \left| sem(c_i^2) \sqsubseteq_s sem\left(c_{q_1}^1, \dots, c_{q_p}^1\right)\right.$$ [34]

Où $sem(c_i)$ définit la sémantique du concept c_i.

Pour identifier **(P2)** et **(P3)**, nous avons considéré dans l'assertion précédente :

1. Uniquement les concepts obligatoires de MC_{SI_2} (la sémantique centrale). Nous pouvons justifier ce choix par le fait que les concepts non-obligatoires appartenant à C_{SI_2} sont, par définition, non nécessaires pour que l'implémentation du modèle conceptuel de SI_2 se réalise correctement.

[34] L'opérateur « $\sqsubseteq_s$ » représente la propriété de subsomption sémantique

2. La totalité des concepts de C_{SI_1} (la sémantique étendue) étant donné que l'étude de l'interopérabilité concerne celle de SI_1 vers SI_2. Ceci implique l'échange des informations de SI_1 sans distinction faites sur leur caractère obligatoire.

2. Formalisation de la relation d'interopérabilité sémantique $\mathbf{R^2_{c_i}}$

Les propriétés de l'interopération formellement introduites précédemment, nous ramène à l'identification de la relation sémantique $R^2_{c_i}$ que nous formalisons par la relation suivante :

$$R^2_{c_i} = \langle c_i^2, \left(c_{q_1}^1, \dots, c_{q_p}^1\right)\rangle$$

La relation $R^2_{c_i} = \langle c_i^2, \left(c_{q_1}^1, \dots, c_{q_p}^1\right)\rangle$ est interprétée comme suit: c_i^2 est sémantiquement subsumée par $\left(c_{q_1}^1, \dots, c_{q_p}^1\right)$, c'est-à-dire la sémantique de $\left(c_{q_1}^1, \dots, c_{q_p}^1\right)$ contient la sémantique de c_i^2. Cette relation sémantique n'est pas nécessairement une relation d'équivalence.

Par ailleurs, la relation sémantique $R^2_{c_i}$, si elle existe, est exclusivement identifiée par l'expert du domaine qui est le seul garant de la pertinence des relations résultantes. En ce sens, l'expert peut avoir recours aux différentes approches de mise en correspondances sémantiques existantes (la mise en correspondance des schémas, d'ontologies…).

Le but de ce mémoire de thèse n'est pas de développer une telle approche mais plutôt de formaliser les relations sémantiques résultantes afin de permettre l'évaluation de l'interopération. C'est pourquoi, nous nous contentons de présenter succinctement un état de l'art de l'ensemble de ces approches dans la section suivante.

L'ensemble des relations sémantiques identifiées par les experts du domaine est formellement défini comme suit :

$$\boldsymbol{R_c^2 = \left\{ R_{c_i}^2 = \langle c_i^2, \left(c_{q_1}^1, \dots, c_{q_p}^1\right)\rangle \;\middle|\; c_i^2 \in MC_{SI_2} \wedge \left(c_{q_1}^1, \dots, c_{q_p}^1\right) \in P\left(C_{SI_1}\right)\right\}}$$

où $P\left(C_{SI_1}\right)$ est l'ensemble des p-uplets $\left(c_{q_1}^1, \dots, c_{q_p}^1\right)$ formés à partir des éléments de C_{SI_1}, pour $p \in \{1, \dots, s_1\}$ et $s_1 = \left|C_{SI_1}\right|$.

On peut également noter que R_c^2 est le graphe de la relation binaire $\mathcal{R}^2$ telle que $\mathcal{R}^2 \subseteq MC_{SI_2} \times P\left(C_{SI_1}\right)$.

Si on considère le concept $c_i^2 \in MC_{SI_2}$ et l'ensemble des p-uplets $\left(c_{q_1}^1, \dots, c_{q_p}^1\right) \in \left(C_{IS_1}\right)^p$ alors $c_i^2 \ \mathcal{R}^2 \ \left(c_{q_1}^1, \dots, c_{q_p}^1\right)$ signifie que la relation sémantique $R_{c_i}^2 = \langle c_i^2, \left(c_{q_1}^1, \dots, c_{q_p}^1\right)\rangle$ existe.

Pour interpréter la relation sémantique $R_{c_i}^2$, nous pouvons considérer les deux cas suivants :

i. Si pour un concept particulier $c_i^2 \in MC_{SI_2}$, la relation sémantique $R_{c_i}^2$ ne peut pas être identifiée, alors il y a une perte sémantique liée à ce concept lorsque SI_1 collabore avec SI_2.
ii. S'il existe une relation sémantique $R_{c_i}^2$ entre c_i^2 et un seul ou plusieurs concepts issus de C_{IS_1}, alors il n'y a pas de perte sémantique liée au concept c_i^2.

3. Formalisation de la relation d'interopérabilité sémantique $\mathbf{R_{c_i}^{2e}}$

Nous définissons aussi R_c^{2e} comme étant le sous-ensemble de R_c^2 restreint aux relations $R_{c_i}^2 = \langle c_i^2, \left(c_{q_1}^1, \dots, c_{q_p}^1\right)\rangle$ telles que le *p*-uplet $\left(c_{q_1}^1, \dots, c_{q_p}^1\right)$ contient uniquement des concepts obligatoires (c'est-à-dire appartenant à $\boldsymbol{MC_{SI_1}}$). Ainsi, R_c^{2e} est formellement défini comme suit:

$$\boldsymbol{R_c^{2e}} = \left\{ \boldsymbol{R_{c_i}^2 = \langle c_i^2, \left(c_{q_1}^1, \dots, c_{q_p}^1\right)\rangle} \;\middle|\; \boldsymbol{c_i^2 \in MC_{SI_2} \wedge \left(c_{q_1}^1, \dots, c_{q_p}^1\right) \in \mathbf{P}\left(MC_{SI_1}\right)} \right\}$$

4. Formalisation de l'écart sémantique

Formellement, un écart sémantique (ou gap sémantique) existe lorsque la condition suivante est satisfaite:

$$\boldsymbol{\exists c_i^2 \in MC_{SI_2} \left| \forall \left(c_{q_1}^1, \dots, c_{q_p}^1\right) \in \mathbf{P}\left(C_{SI_1}\right), \neg \left(c_i^2 \ \mathcal{R}^2 \ \left(c_{q_1}^1, \dots, c_{q_p}^1\right)\right)\right.}$$

Cette condition exprime le fait qu'il existe un concept obligatoire pour lequel il est impossible de construire une relation sémantique. Ce qui veut dire que la sémantique de ce concept est absente du premier système d'information : il y a donc un écart sémantique.

5. Formalisation de la relation d'interopérabilité de SI_2 vers SI_1

L'étude de l'interopération de SI_2 vers SI_1, nécessite quant à elle, la définition de l'ensemble des relations sémantiques R_c^1 et $\mathcal{R}^1$, conformément à la syntaxe de R_c^2 et $\mathcal{R}^2$. Ceci implique que :

$$\boldsymbol{R_c^1 = \left\{ R_{c_i}^1 = \langle c_i^1, \left(c_{q_1}^2, \dots, c_{q_p}^2\right)\rangle \;\middle|\; c_i^1 \in MC_{SI_1} \wedge \left(c_{q_1}^2, \dots, c_{q_p}^2\right) \in P\left(C_{SI_2}\right) \right\}}$$

Où $P(C_{SI_2})$ est l'ensemble des p-uplets $\left(\boldsymbol{c_{q_1}^2}, \ldots, \boldsymbol{c_{q_p}^2}\right)$ formés à partir des éléments de C_{SI_2}, pour $p \in \{1, \ldots, s_2\}$ et $s_2 = |C_{SI_2}|$.

De plus, R_c^1 est le graphe de la relation binaire $\mathcal{R}^1$ telle que $\mathcal{R}^1 \subseteq MC_{SI_1} \times P(C_{SI_2})$.

Et nous pouvons définir R_c^{1e} de la même manière que R_c^{2e}

$$\boldsymbol{R_c^{1e}} = \left\{ \boldsymbol{R_{c_i}^1} = \langle \boldsymbol{c_i^1}, \left(\boldsymbol{c_{q_1}^2}, \ldots, \boldsymbol{c_{q_p}^2}\right)\rangle \,\middle|\, \boldsymbol{c_i^1} \in \boldsymbol{MC_{SI_1}} \wedge \left(\boldsymbol{c_{q_1}^2}, \ldots, \boldsymbol{c_{q_p}^2}\right) \in \mathbf{P}\left(\boldsymbol{MC_{SI_2}}\right)\right\}$$

Les approches facilitant l'identification de ces relations sémantiques par les experts du domaine sont présentées dans la section suivante.

1.2. Les approches d'identification des relations sémantiques

Pour étudier l'interopérabilité sémantique entre deux systèmes d'information à travers leurs modèles conceptuels (dont les concepts sont respectivement notés CSI_1 et CSI_2), un expert du domaine doit tout d'abord identifier les différentes relations sémantiques existantes (c'est-à-dire identifier R_c^1 et R_c^2) entre les entités des modèles conceptuels. Ces relations sémantiques définissent les correspondances entre les entités des deux modèles conceptuels en indiquant pour un concept donné de CSI_1 si sa sémantique est subsumée par la sémantique d'un ou de plusieurs concepts de CSI_2. En résumé, ces relations correspondent aux diverses associations sémantiques, basées sur des notions intuitives comme la connectivité et la similarité sémantique (Aleman-Meza, et al. 2003).

Selon (Sheth, et al. 2005), la sémantique « implique que les relations significatives à notre système d'information SI peuvent être déduites en se basant soit sur les données fournies ou avec l'aide de connaissance supplémentaire. Pour déterminer la pertinence **des associations sémantiques,** il est nécessaire de capturer le **contexte** dans lequel elles vont être interprétées (ou les domaines d'intérêt des utilisateurs)»[35].

[35] "involves those relations that are meaningful to our IS and can be inferred either based on the data itself or with the help of additional knowledge. To determine the relevance of semantic associations it is necessary to capture the context within which they are going to be interpreted (or the domains of the user interest)".

Parmi les approches qui permettent d'établir les diverses associations sémantiques, nous pouvons citer la mise en correspondance des ontologies (ontology mapping) (Choi, Song et Han 2006), l'appariement de schémas (schema matching) ((Rahm et Bernstein 2001), (Evermann 2009) et (Wang, et al. 2004)) et le morphisme de schémas (schema morphism) (Goguen et Burstall 1984). Ces approches définissent des similitudes sémantiques en reliant les entités à travers des relations sémantiques, auxquelles sont, parfois, attachées des mesures qualitatives.

Par contre, il existe plusieurs configurations possibles (Isaac, et al. 2009) quand il s'agit d'identifier ces correspondances. En fait, les entités des modèles conceptuels statiques peuvent avoir une construction simple ou complexe. De plus la mise en correspondance peut être directe ou indirecte (Jung 2010), élaborée manuellement (par des experts), d'une façon semi-automatique ou complètement automatisée. Par ailleurs, la mesure rattachée à la mise en correspondance peut être définie comme une probabilité de correspondance ou un degré de similitude objectivement mesurable ou à une valeur de rapprochement sémantique (David et Euzenat 2008) qui est comprise dans l'intervalle [0,1] comme, par exemple, la mesure de similitude de Cosinus, le coefficient de similitude Jaccard (Cheng, et al. 2008).

L'appariement et le morphisme de schémas sont deux approches ne se basant pas sur des considérations logiques formelles et exigent pour leur mise en place des manipulations syntaxiques (Shilliday, et al. 2010). De plus, le morphisme de schémas a l'avantage de tenir compte d'aspects partiellement sémantiques comme la concaténation (par exemple, "full-name" correspond à ("first-name" et "last-name") et permet la vérification formelle des entités résultantes (Goguen 2005) .

Par contre, la correspondance d'ontologies est une approche typiquement basée sur des considérations logiques et se sert de plusieurs ontologies pour capturer la sémantique du domaine spécifique à n'importe quel concept. La mise en correspondance est souvent exécutée manuellement par les experts du domaine, familiers avec un ou plusieurs domaines spécifiques de l'industrie, et peut être réalisée à l'aide de différentes techniques basées sur la comparaison des structures de l'ontologie ou la sémantique linguistique des concepts (Kalfoglou et Schorlemmer 2003).

Il est aussi possible d'avoir recours à une ontologie existante de type « ontologie supérieure » (top domain ontology, en anglais) pour spécifier le contexte et ensuite identifier les associations sémantiques comme dans (Yahia, Yang, et al. 2009) . En effet, un expert du domaine doit pouvoir mettre en correspondance les concepts d'un modèle conceptuel avec les concepts de l'« ontologie supérieure ». Cette ontologie peut être soit générique comme DOLCE (Masolo, et al. 2003) et CYC (Reed et Lenat 2002), soit spécifique au domaine comme PRONTO (Vegetti, Henning et Leone 2005) ou ONTO-PDM (Tursi, et al. 2009) qui sont des ontologies relatives aux données techniques des produits manufacturés

ou comme l'ontologie liée à UEML 3.1 qui permet de spécifier un Langage Unifié de Modélisation d'Entreprise (Anaya, et al. 2010).

Cependant, cette dernière approche, si elle est adoptée, exige un effort significatif pour :

1. Construire (ou identifier) les deux ontologies correspondantes aux deux CSI (si elles n'ont pas été déjà développées)
2. Définir les concepts des ontologies pour prendre en considération les définitions spécifiques des concepts lexicaux et non-lexicaux résultant de la perspective « fact-oriented modelling ».
3. Identifier les associations sémantiques entre les concepts et ceci en interrogeant les bases de connaissances hétérogènes en utilisant une interface commune ou en transformant des données ayant différentes représentations. La découverte des correspondances sémantiques peut être facilitée à l'aide des outils de type MAFRA (Maedche, et al. 2002) et IF-Map (Kalfoglou et Schorlemmer 2003).

Le choix d'une approche, pour aboutir à la définition des relations sémantiques formalisées dans la section 1.1 de ce chapitre, dépend uniquement des considérations propres aux experts des systèmes d'informations étudiés. Ces considérations concernent principalement les coûts, le temps, l'effort et l'expertise requise.

De notre point de vue et conformément à toute la démarche d'évaluation que nous défendons dans ce manuscrit de thèse, nous pourrions identifier les relations sémantiques en considérant le morphisme de schémas qui fournit, quant à lui, les relations sémantiques appropriées entre des concepts. Par ailleurs, l'expert du domaine est, au final, le seul garant de la pertinence des relations établies.

2. Les caractéristiques de l'interopérabilité sémantique

Nous mettons en évidence, dans cette section, les différentes caractéristiques de l'interopérabilité sémantique. Il s'agit d'identifier, en première partie (section 2.1), les propriétés régissant l'interopérabilité à savoir la non-symétrie, la potentialité et l'effectivité. Nous caractérisons, en deuxième partie (section 2.2), chacun des différents degrés d'interopérabilité.

2.1. Les propriétés de l'interopérabilité sémantique

Nous avons montré que la définition de l'interopérabilité sémantique métier dépend du domaine d'application du système et se réfère à la capacité de deux systèmes d'information à échanger les données tout en préservant leur sémantique, et à la capacité du système

destinataire à traduire ou convertir les informations reçues dans le but d'assurer des échanges collaboratifs efficaces.

Si nous considérons deux systèmes d'information hétérogènes SI_1 et SI_2, dire que SI_1 est sémantiquement interopérable avec SI_2 implique que SI_1 est capable d'échanger des informations avec SI_2 qui opère en utilisant les informations envoyées selon une sémantique commune, et ceci pour réaliser un objectif spécifique dans un contexte donné. Il en résulte que SI_2 est capable d'exploiter les informations acquises de SI_1 conformément aux correspondants sémantiques parmi ces propres informations (voir chapitre 1, section 4.2).

Cette définition implique que l'ensemble des relations sémantiques entre les concepts obligatoires de MC_{SI_2} et ceux de C_{SI_1} noté $\boldsymbol{R_c^2}$ est complet $\left(\forall\, c_i^2 \in MC_{SI_2}, \exists R_{c_i}^2 = \langle c_i^2, \left(c_{q_1}^1, \dots, c_{q_p}^1\right)\rangle\right)$.

L'ensemble des caractéristiques qui découlent de la définition de l'interopérabilité sémantique nous permet de déduire les propriétés suivantes :

1. Non symétrie (section 2.1.1)
2. Potentialité (section 2.1.2)
3. Effectivité (section 2.1.3)

2.1.1. La propriété de non symétrie

La définition de l'interopérabilité que nous avons adoptée pour ce mémoire de thèse permet de spécifier que la relation d'interopérabilité n'est pas, nécessairement, une relation symétrique. Cela signifie qu'il est possible que SI_1 soit interopérable avec SI_2 tandis que SI_2 ne l'est pas avec SI_1. Ceci peut ne pas être gênant dans un contexte où l'interopérabilité est souhaitée dans une unique direction pour deux systèmes d'information d'entreprises collaboratives, l'autre direction étant non nécessaire et ne contribuant pas à la réalisation de la mission spécifiée.

Il en résulte que l'évaluation de l'interopérabilité entre deux systèmes d'information d'entreprises collaboratives peut être conduite, séparément, selon deux directions, de SI_1 vers SI_2 et/ou vice versa. Considérons l'exemple de la Figure 38, le système d'information S1 a besoin d'interopérer avec S3 d'où l'intérêt d'évaluer l'interopérabilité de S1 vers S3. En revanche, si on considère l'autre direction, de S3 vers S1, il n'y a pas un besoin d'interopérabilité donc il n'est pas forcément utile d'évaluer l'interopérabilité dans cette direction.

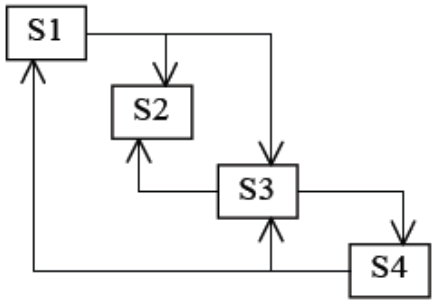


Figure 38. Couplage des systèmes d'information. Source (Autran, et al. 2008)

2.1.2. Les propriétés d'interopérabilité potentielle maximale

Si nous considérons la sémantique étendue fournie par l'ensemble des concepts (obligatoires et non obligatoires) de C_{SI_1} pour définir l'ensemble des relations d'interopérabilité R_c^2, nous ne tenons pas compte du fait que ces relations identifiées peuvent mettre en correspondance des concepts qui sont **non-disponibles** ; l'entière disponibilité de ces concepts requiert en effet que l'ensemble des instances, même celles des concepts non-obligatoires NMC_{SI_1}, soit complètement renseigné par les utilisateurs des systèmes d'information étudiés. Ces caractéristiques permettent de qualifier l'interopérabilité qui peut être déduite de ces relations comme étant une **interopérabilité potentielle maximale**. La caractéristique « potentielle » se justifie par le fait qu'il est impossible de garantir que la totalité des concepts non obligatoires soit instanciée par les utilisateurs du système d'information SI_1 (et ceci par le caractère non obligatoire de ces concepts). Par ailleurs, plus R_c^2 fait intervenir des concepts non obligatoires de SI_1, plus l'interopération de SI_1 vers SI_2 risque de ne pas être effective (il y a un risque non nul qu'un concept non obligatoire ne soit pas instancié et donc que cette information manque dans la relation sémantique).

Définition 1. Interopérabilité potentielle maximale

Etant donnés deux systèmes d'information SI_1 et SI_2, nous appelons « interopérabilité potentielle maximale de SI_1 vers SI_2 », l'interopérabilité obtenue lorsque tous les concepts de SI_1 (même non-obligatoires) sont instanciés et peuvent ainsi potentiellement participer à l'interopération.

2.1.3.Les propriétés d'interopérabilité effective minimale

Lorsque nous restreignons l'étude des relations sémantiques R_c^2 à l'étude des relations sémantiques R_c^{2e} définies par :

$R_c^{2e} = \left\{ R_{c_i}^2 = \langle c_i^2, \left(c_{q_1}^1, \dots, c_{q_p}^1\right)\rangle \,\middle|\, c_i^2 \in MC_{SI_2} \wedge \left(c_{q_1}^1, \dots, c_{q_p}^1\right) \in \mathrm{P}\left(MC_{SI_1}\right)\right\}$, nous pouvons garantir que ces relations sont effectives étant donné que (par définition) la totalité de la sémantique est fournie par les concepts obligatoires de MC_{SI_1} participant à l'élaboration de R_c^{2e}. L'interopération qui peut être déduite de ces relations peut alors être qualifiée d'effective et minimale. En effet dans ces relations, on peut garantir que l'information sera présente (le concept est obligatoire et donc nécessairement instancié) et que l'information sera comprise (la relation sémantique existe).

Définition 2. Interopérabilité effective minimale

Etant donnés deux systèmes d'information SI_1 et SI_2, nous appelons « interopérabilité effective minimale de SI_1 vers SI_2 », l'interopérabilité obtenue lorsque seuls les concepts obligatoires de SI_1 sont instanciés et participent effectivement à l'interopération.

2.2. Les degrés de l'interopérabilité sémantique

L'interopérabilité sémantique peut être classée selon plusieurs degrés. Les travaux de (He, Wang et Liang 2010) et (Stroetmann, Rodrigues et Stroetmann 2006) permettent de décrire les caractéristiques essentielles de chacun de ces degrés.

1. Interopérabilité sémantique totale (section 2.2.1)
2. Interopérabilité sémantique partielle (section 2.2.2)
3. Absence d'interopérabilité sémantique (section 2.2.3)

2.2.1. Interopérabilité sémantique totale

Deux systèmes d'information SI_1et SI_2 peuvent **entièrement** partager leurs informations et réaliser l'interopération voulue dans le cas où SI_2 est capable d'utiliser les informations acquises de SI_1 dont il a besoin pour instancier tous ses concepts obligatoires.

Dans notre cas, supposer que SI_1 est complètement interopérable avec SI_2 implique que $|R_c^2| = t_2$ (avec $t_2 = \left|MC_{SI_2}\right|$). Ceci signifie qu'il existe une relation sémantique pour chacun des concepts obligatoires de MC_{SI_2}. De la même manière, supposer que SI_2 est complètement interopérable avec SI_1 implique que $|R_c^1| = t_1$ (avec $t_1 = \left|MC_{SI_1}\right|$).

Définition 3. Interopérabilité sémantique totale

Etant donnés deux systèmes d'information SI_1 et SI_2, L'interopérabilité sémantique de SI_1 vers SI_2 est dite totale si $|R_c^2| = \left|MC_{SI_2}\right|$.

2.2.2. Interopérabilité sémantique partielle

L'interopérabilité sémantique partielle entre les différentes entités de systèmes d'information coïncide selon (He, Wang et Liang 2010)[36] à un *agrément partiel concernant la sémantique partagée par les différents systèmes [...]*. Le degré d'interopérabilité sémantique partielle est normalement représenté par le pourcentage de sémantique partagée. Par ailleurs, 100 % représentent l'interopérabilité totale, tandis qu'un pourcentage inférieur à 100 % correspond à l'interopérabilité sémantique partielle.

En résumé, SI_1 est partiellement interopérable avec SI_2 lorsque $|R_c^2| < |MC_{SI_2}|$ et SI_2 est partiellement interopérable avec SI_1 lorsque $|R_c^1| < |MC_{SI_1}|$.

Définition 4. Interopérabilité sémantique partielle

Etant donnés deux systèmes d'information SI_1 et SI_2, L'interopérabilité sémantique de SI_1 vers SI_2 est dite partielle lorsque $|R_c^2| < |MC_{SI_2}|$.

2.2.3. Absence d'interopérabilité sémantique

Ce cas se réfère à la situation où il y a absence totale d'interopérabilité sémantique entre les systèmes d'information d'entreprises collaboratives, ce qui n'empêche pas d'assurer que l'interopérabilité technique est effective. L'absence de l'interopérabilité sémantique se traduit formellement par l'absence de relations sémantiques, ce qui implique que l'ensemble R_c^2 est vide ($|R_c^2| = 0$).

2.2.4. Tableau récapitulatif des degrés d''interopérabilité sémantique

Nous avons montré, dans le chapitre 2, que l'étude de l'interopérabilité de SI_1 vers SI_2 consiste à prendre en considération la **sémantique centrale minimale** de SI_2 définie par MC_{SI_2} et d'identifier pour chaque concept c_i^2 de MC_{SI_2} l'ensemble des concepts appartenant à C_{SI_1}, qui subsume la sémantique de c_i^2 définissant ainsi les relations sémantiques.

En ce sens, plusieurs configurations peuvent être déterminées selon le degré d'interopération identifié. Nous distinguons principalement, les trois cas suivants :

[36] It refers to partial satisfaction of the semantic agreement [...]. The degree of partial semantic interoperability is normally represented by the percentage of shared [semantics]. 100% represents the [full] interoperability, and lower percentage means [partial] semantic interoperability (He, Wang et Liang 2010)

I. R_c^2 est vide, il y a un écart sémantique étant donné qu'aucune relation sémantique n'existe ($|R_c^2| = 0$). Il en résulte que la sémantique minimale obligatoire de SI_2 ne peut pas être fournie par SI_1 (la sémantique de SI_1 est disjointe de la sémantique minimale obligatoire de SI_2), ce qui nous permet de déduire que SI_1 n'est pas interopérable avec SI_2. (Figure 36 (a))

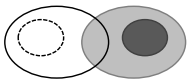
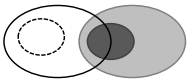
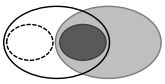
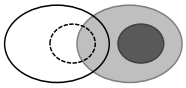
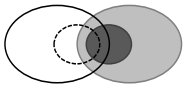
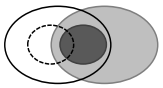
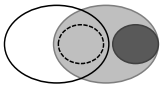
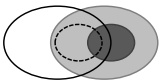
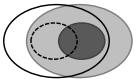
II. Les relations sémantiques appartenant à l'ensemble R_c^2 ont pu être identifiées, uniquement, pour une partie des concepts obligatoires de MC_{SI_2}, il en résulte que $|R_c^2| < |MC_{SI_2}|$ et que SI_1 est partiellement interopérable avec SI_2. (Figure 36 (b))

L'évaluation de l'écart sémantique entre SI_1 et SI_2 est alors possible en évaluant quantitativement le nombre de relations sémantiques manquantes (qui empêchent une interopération totale) : ce sont les relations sémantiques qui n'ont pas pu être identifiées.

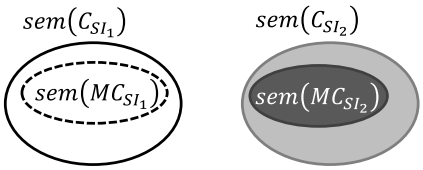
III. Les relations sémantiques appartenant à R_c^2 ont pu être identifiées pour chaque concept de MC_{SI_2}, il en résulte que $|R_c^2| = |MC_{SI_2}|$ et que la sémantique de SI_1 subsume complètement la sémantique obligatoire de SI_2. Dans ce cas, SI_1 est complètement interopérable avec SI_2. (Figure 36 (d) ou (e))

Nous récapitulons, dans le Tableau 5, l'ensemble des configurations possibles se référant à l'étude de l'interopérabilité entre deux systèmes d'information et en considérant les deux directions d'interopération possibles. L'intersection entre la sémantique centrale minimale d'un système d'information donné et la sémantique de l'autre système information traduit l'existence des relations sémantiques identifiées entre leurs concepts respectifs.

Tableau 5. Les différentes configurations de l'interopérabilité sémantique entre deux systèmes d'information SI_1 et SI_2

$\lvert R_c^1\rvert$ \ $\lvert R_c^2\rvert$	$= 0$	$<\lvert MC_{SI_2}\rvert$	$= \lvert MC_{SI_2}\rvert$
$= 0$	Pas d'interopérabilité sémantique 	SI_1 est partiellement interopérable avec SI_2. 	SI_1 est totalement interopérable avec SI_2. 
$<\lvert MC_{SI_1}\rvert$	SI_2 est partiellement interopérable avec SI_1. 	SI_2 est partiellement interopérable avec SI_1 et SI_1 est partiellement interopérable avec SI_2. 	SI_2 est partiellement interopérable avec SI_1 et SI_1 est totalement interopérable avec SI_2. 
$= \lvert MC_{SI_1}\rvert$	SI_2 est totalement interopérable avec SI_1. 	SI_2 est totalement interopérable avec SI_1 et SI_1 est partiellement interopérable avec SI_2. 	SI_1 et SI_2 sont totalement interopérables. 

En se basant sur la notation suivante :



3. Évaluation de l'interopérabilité sémantique

L'apport de cette partie du mémoire de thèse consiste dans la présentation de l'approche d'évaluation de l'interopérabilité sémantique que nous proposons. Cette approche est basée principalement sur l'étude des modèles conceptuels des systèmes d'information d'entreprises considérés. Nous prenons le parti de considérer ces systèmes comme des boîtes blanches pour analyser en détail l'ensemble des entités de leurs modèles conceptuels. La méthode de formalisation des relations sémantiques proposée dans la section 1.1 permet de spécifier les différents ensembles de relations sémantiques suivant la direction de l'interopérabilité adoptée (respectivement R_c^1 et R_c^2). Ces ensembles de relations

sémantiques sont une entrée de la méthode d'évaluation que nous proposons dans ce chapitre.

L'interopérabilité sémantique complète entre les systèmes d'information est rarement atteignable si nous traitons de cas industriels réels. Par conséquence, les préoccupations les plus significatives des entreprises collaboratives concernent particulièrement l'interopérabilité partielle, c'est à dire lorsque $|R_c^1| < |MC_{SI_1}|$ et/ou $|R_c^2| < |MC_{SI_2}|$.

Nous proposons donc une approche pour évaluer l'écart sémantique lors de l'interopérabilité partielle de systèmes d'information d'entreprises collaboratives à travers l'identification des relations sémantiques manquantes pour assurer une interopérabilité sémantique totale.

Pour répondre à cette problématique, nous formalisons des métriques permettant de quantifier le degré d'interopérabilité, et par suite de mettre en place des actions d'améliorations pour atteindre un degré d'interopérabilité désiré.

3.1. Approche d'évaluation de l'interopérabilité sémantique

L'évaluation de l'interopérabilité entre deux systèmes d'information SI_1 et SI_2 à travers l'analyse de leurs modèles conceptuels est basée sur la caractérisation de l'écart entre leurs sémantiques respectives. Nous proposons dans cette section de formaliser différentes métriques élaborées à travers la comparaison de deux états : le réel et le désiré (pour interopérer totalement).

Nous restreignons notre étude à une unique direction de l'interopérabilité, de $\boldsymbol{SI_1}$ vers $\boldsymbol{SI_2}$ sans perte de généralité.

L'état désiré est atteint lorsque R_c^2 (l'ensemble des relations sémantiques identifiées par l'expert) contient l'ensemble des relations sémantiques nécessaires pour garantir une interopérabilité sémantique totale de SI_1 vers SI_2. Il s'agit donc d'un état dans lequel l'expert a pu identifier une relation sémantique pour chaque concept obligatoire. Ceci correspond à $|R_c^2| = |MC_{SI_2}|$.

En se basant sur les diverses propriétés de l'interopérabilité sémantique identifiées dans la section 2.1, nous proposons, dans cette section, deux principales métriques pour évaluer le potentiel et l'effectivité de l'interopérabilité.

3.1.1. Évaluation de l'interopérabilité potentielle maximale

La métrique que nous proposons pour évaluer **l'interopérabilité potentielle maximale** entre deux systèmes d'information SI_1 et SI_2 (de SI_1 vers SI_2) est identifiée à partir des propriétés

de l'interopérabilité potentielle spécifiées dans la section 2.1.2 de ce chapitre en se basant sur les relations sémantiques R_c^2 identifiées par les experts.

1. L'interopérabilité potentielle

La métrique de l'interopérabilité potentielle est notée $\nu_{1\to2}$(%), et définie comme suit :

$$\boldsymbol{\nu_{1\to2} = \frac{|R_c^2|}{|MC_{SI_2}|}}$$

$\nu_{1\to2}$ mesure le ratio du nombre de relations sémantiques R_c^2 identifiées par les experts sur le nombre total des relations sémantiques attendues $R_{c_{expected}}^2 = MC_{SI_2}$ (qui représente l'état correspondant à l'interopérabilité totale). Lorsque la valeur de $\nu_{1\to2}$ est inférieure à 100%, on peut conclure que l'interopérabilité est partielle et l'écart sémantique est d'autant plus faible que la valeur de $\nu_{1\to2}$ est proche de 100 %.

2. L'écart sémantique

L'écart sémantique est évalué par $\boldsymbol{1 - \nu_{1\to2}}$ et correspond à la sémantique des concepts c_i^2 de MC_{SI_2} pour lesquels la relation $R_{c_i}^2$ n'existe pas (il n'existe pas de concept dans SI_2 dont la sémantique subsume la sémantique de c_i^2). L'écart sémantique correspond à la sémantique des concepts de l'ensemble formellement défini par $\left\{c_i^2 \in C_{SI_2} \middle| \left(\nexists \left(c_{q_1}^1, \dots, c_{q_p}^1\right) \in P\left(C_{SI_1}\right) \middle| R_{c_i}^2 = \langle c_i^2, \left(c_{q_1}^1, \dots, c_{q_p}^1\right)\rangle\right)\right\}$.

3. Effectivité associée

Il est à noter que la métrique $\nu_{1\to2}$ n'est pas suffisante pour évaluer l'interopérabilité si nous considérons l'effectivité des relations sémantiques R_c^2 identifiées. En effet, seules les relations sémantiques identifiées et ayant pour domaine et co-domaine respectivement MC_{SI_1} et MC_{SI_2} sont garanties comme effectives (les concepts de MC_{SI_1}et MC_{SI_2} étant obligatoirement instanciés par les utilisateurs). Ces relations sont identifiées par l'ensemble R_c^{2e}.

Il est ainsi important de mesurer l'effectivité des relations sémantiques identifiées. En ce sens, nous proposons la métrique $\varepsilon_{1\to2}$ (%) définie comme suit :

$$\boldsymbol{\varepsilon_{1\to2} = \frac{|R_c^{2e}|}{|R_c^2|}}$$

La métrique de l'effectivité évalue, pour un degré d'interopérabilité potentielle donné, le ratio du nombre de relations sémantiques R_c^{2e} sur le nombre total des relations sémantiques R_c^2**.** L'effectivité des relations sémantiques identifiées est d'autant plus grande que la valeur de $\varepsilon_{1\to2}$ est proche de 100%.

4. Le risque sémantique

La valeur $(\mathbf{1} - \boldsymbol{\varepsilon_{1\to2}})$ représente le risque de retrouver des relations sémantiques R_c^2 non effectives. En effet, il s'agit du pourcentage de relations sémantiques dont le co-domaine implique des concepts non-obligatoires pouvant ainsi, par définition, ne pas être instanciés (ce qui veut dire que l'information nécessaire à SI_2 pour réaliser sa mission dans le cadre de la collaboration peut ne pas être présente).

5. En Résumé

$\nu_{1\to2}$ et $\varepsilon_{1\to2}$ permettent d'évaluer respectivement **l'interopérabilité potentielle maximale** et de mesurer l'**effectivité** de cette interopérabilité.

Typiquement SI_1 peut interopérer avec SI_2 avec une mesure du potentiel égale à $\nu_{1\to2}$ $(\%)$ et une mesure d'effectivité égale à $\varepsilon_{1\to2}$ $(\%)$. Ceci met l'accent sur la qualité des relations sémantiques identifiées ; en effet, seules $\varepsilon_{1\to2}$ $(\%)$ des relations sont garanties comme étant effectives (sans aucun risque de non-disponibilité des informations).

6. L'interopérabilité potentielle maximale

Quand on considère uniquement la totalité des relations sémantiques identifiées par les experts pour estimer l'interopérabilité potentielle sans tenir compte de l'effectivité, nous évaluons alors ce que nous avons appelé **l'interopérabilité potentielle maximale** dans la section 2.1.2 (qui représente le potentiel réel d'un système d'information à interagir avec un autre système d'information en faisant l'hypothèse que toutes les informations sont disponibles).

Nous détaillons dans la section suivante, l'approche pour évaluer l'interopérabilité effective minimale (Voir section2.1.3).

3.1.2. Evaluation de l'interopérabilité effective minimale

L'évaluation de l'interopérabilité effective minimale pour deux systèmes d'information donnés est réalisée en ne considérant que les informations effectivement disponibles et donc les relations sémantiques identifiées dans R_c^{2e}. Cela nous permet d'identifier deux mesures : $\nu_{1\to2}^{e}$ $(\%)$ et $\varepsilon_{1\to2}^{e}(\%)$ afin d'évaluer **qualitativement** l'interopérabilité.

1. **Métrique de l'interopérabilité effective minimale $\nu^{e}_{1\to2}\,(\%)$**

Formellement, $\nu^{e}_{1\to2}\,(\%)$ est définie comme suit :

$$\boldsymbol{\nu^{e}_{1\to2}} = \frac{|\boldsymbol{R^{2e}_{c}}|}{|\boldsymbol{MC_{SI_2}}|} = \frac{|\boldsymbol{R^{2}_{c}}|}{|\boldsymbol{MC_{SI_2}}|} \times \frac{|\boldsymbol{R^{2e}_{c}}|}{|\boldsymbol{R^{2}_{c}}|} = \boldsymbol{\nu_{1\to2}} \times \boldsymbol{\varepsilon_{1\to2}}$$

$\nu^{e}_{1\to2}$ mesure le ratio du nombre de relations sémantiques effectives identifiées sur le nombre total de relations sémantiques attendues pour pouvoir interopérer complètement.

2. **Effectivité associée**

Étant donné que nous considérons, pour l'évaluation de l'interopérabilité effective minimale, uniquement les relations sémantiques qui sont garanties comme effectives, la métrique d'effectivité $\boldsymbol{\varepsilon^{e}_{1\to2}}$ associée à la métrique d'interopérabilité effective minimale sera égale à 100%. En effet, la métrique est définie par :

$$\boldsymbol{\varepsilon^{e}_{1\to2}} = \frac{|\boldsymbol{R^{2e}_{c}}|}{|\boldsymbol{R^{2e}_{c}}|} = \boldsymbol{100\%}$$

3.1.3. Synthèse de notre approche d'évaluation de l'interopérabilité

Dans cette section, nous synthétisons par le Tableau 6, l'apport de chacune des métriques de l'interopérabilité présentées dans les sections précédentes.

Tableau 6. Les conclusions liées à l'interopérabilité issues de l'analyse des valeurs des couples $(\nu_{1\to2}, \varepsilon_{1\to2})$ et $(\nu^{e}_{1\to2}, \varepsilon^{e}_{1\to2})$

Type d'évaluation	Mesure d'interopérabilité	Valeur	Conclusion
Interopérabilité potentielle maximale	$\nu_{1\to2}$	= 0	SI_1 n'est pas interopérable avec SI_2. L'écart sémantique est égal à 100%.
		$< 100\%$	SI_1 est partiellement interopérable avec SI_2. En revanche, seules $\varepsilon_{1\to2}$ (%) des relations sémantiques appartenant à R_c^2 sont garanties comme effectives. $\nu_{1\to2}$ représente le niveau d'interopérabilité potentielle maximale qui peut être atteint par SI_1 dans le cas où la totalité des concepts participant à la formalisation de R_c^2 sont instanciés.
		$= 100\%$	SI_1 est totalement interopérable avec SI_2. En revanche, seules $\varepsilon_{1\to2}$ (%) des relations sémantiques appartenant à R_c^2 sont effectives. L'interopérabilité complète pourrait être effective si tous les concepts participant à la formalisation de R_c^2 étaient obligatoires.
Interopérabilité effective minimale	$\nu^{e}_{1\to2}$	= 0	SI_1 n'est pas interopérable avec SI_2. L'écart sémantique est égal à 100%.
		$< 100\%$	SI_1 est partiellement interopérable avec SI_2. De plus, l'interopérabilité partielle est effective. Par ailleurs, $\nu^{e}_{1\to2}$ représente le niveau d'interopérabilité effective minimale qui est atteint par SI_1.
		$= 100\%$	SI_1 est totalement interopérable avec SI_2. De plus, cette interopérabilité est effective.

3.1.4. Cartographie des mesures de l'interopérabilité sémantique

L'approche d'évaluation de l'interopération que nous avons introduite nous a permis d'évaluer l'interopérabilité potentielle maximale et l'interopérabilité effective minimale en définissant des métriques appropriées à chacune des propriétés de l'interopérabilité.

Nous présentons, dans la Figure 39, une cartographie des mesures issues des métriques proposées dans notre approche. Les points $IPM = (\nu_{1\to2}, \varepsilon_{1\to2})$ et $IEM = (\nu^{e}_{1\to2}, \varepsilon^{e}_{1\to2})$ représentent respectivement *l'Interopérabilité Potentielle Maximale* et *l'Interopérabilité Effective Minimale*.

Par ailleurs, le point $IIM = (\nu_{1\to2}, \varepsilon^{e}_{1\to2})$ de la Figure 39 correspond à l'***Interopérabilité Intrinsèque Maximale (IIM)*** qui définit l'interopérabilité maximale obtenue en modifiant les propriétés intrinsèques aux systèmes d'informations (transformer des concepts non-obligatoires en concepts obligatoires en adaptant les contraintes associées) sans avoir recours à l'injection de sémantique supplémentaire.

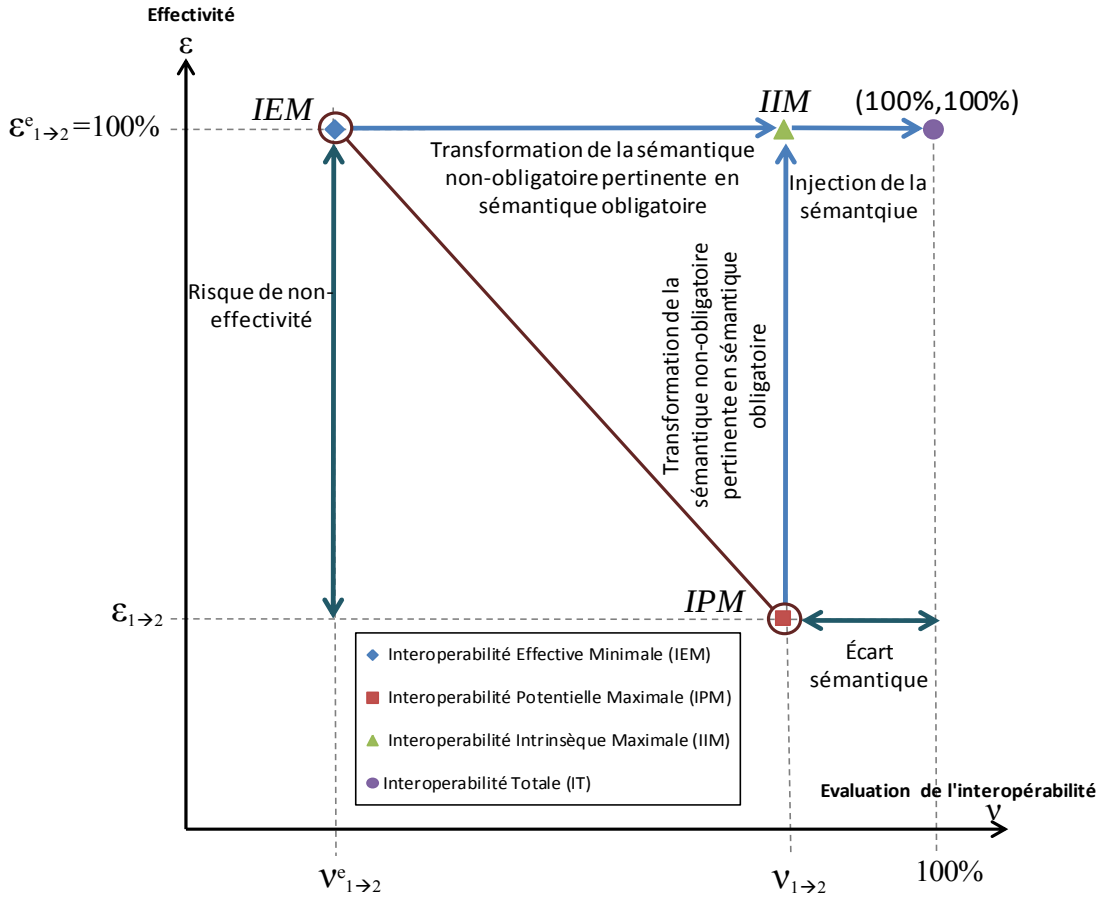


Figure 39. Cartographie des mesures d'interopérabilité sémantique

Cette cartographie représente un apport majeur dans l'évaluation du besoin en interopération entre les systèmes d'information des entreprises collaboratives. L'exemple de la Figure 40, présenté dans la section 1 par (Autran, et al. 2008) et définissant les besoins en interopération entre quatre systèmes d'information donnés peut alors être enrichi en assignant à chaque couple de la matrice de couplage sa propre cartographie des mesures d'interopérabilité sémantique. Ceci nous permet de :

- Identifier le couple faible du réseau
- Identifier les actions à entreprendre d'une façon ponctuelle et/ ou globale.

Nous présentons, dans la Figure 41, une illustration de ces cartographies.

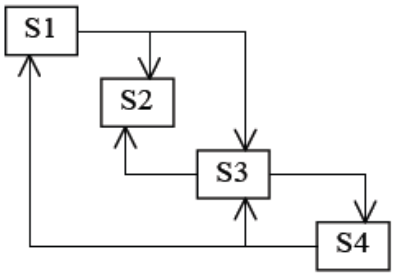


Figure 40. Couplage des systèmes d'information. Source (Autran, et al. 2008)

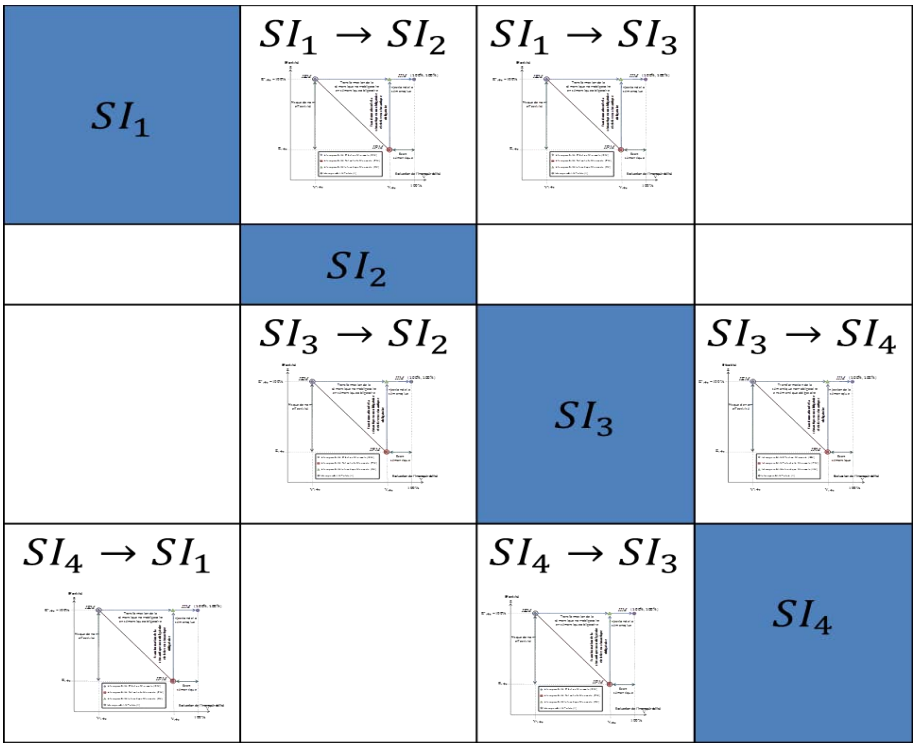


Figure 41. Matrice de couplage des systèmes d'information interopérant enrichie par les cartographies des mesures

3.1.5. Quelques pistes pour l'amélioration de l'interopérabilité suite à son évaluation par les métriques

Améliorer l'interopérabilité des systèmes d'informations d'entreprises collaboratives est l'un des buts principaux pour lequel les métriques des sections précédentes ont été proposées.

Nous proposons dans cette section d'introduire l'ensemble des améliorations qui pourraient être réalisées pour atteindre une interopérabilité maximale suite à l'analyse de la cartographie des mesures d'interopérabilité sémantique. Ces améliorations peuvent être réalisées pratiquement à travers deux actions :

I. Premièrement, atteindre l'***Interopérabilité Intrinsèque Maximale (IIM)*** qui coïncide avec l'interopérabilité maximale obtenue en modifiant les propriétés intrinsèques aux systèmes d'informations. Cet effort peut être conduit en transformant de manière pertinente certains concepts non-obligatoires de C_{SI_1} intervenant dans la formalisation de R_c^2 en concepts obligatoires. Nous postulons que les experts ainsi que les utilisateurs des applications sont les seuls personnes accréditées à juger de la pertinence et à modifier ces propriétés. Il s'agit ici de capitaliser leur connaissance et bonnes pratiques à travers des questionnaires servant à qualifier les concepts obligatoires et non obligatoires. Cependant, ces modifications peuvent être difficiles à mettre en œuvre car elles dépendent du contexte applicatif et ne doivent donc pas être prescriptives.

II. Deuxièmement, atteindre ***l'interopérabilité complète*** (100 % d'interopérabilité avec 100 % d'effectivité). Cela correspond à un effort substantiel qui consiste à rajouter la sémantique manquante dans le but d'atteindre ce niveau. Cette sémantique manquante est identifiée à travers la sémantique des concepts de l'ensemble $R_{c_{expected}}^2 \setminus R_c^2$.

3.2. Évaluation de l'interopérabilité des sous-systèmes

3.2.1. Approche proposée

Nous postulons, dans cette section, que l'approche d'évaluation d'interopérabilité peut être réalisée selon deux niveaux :

I. **Niveau 1** : Evaluation de l'interopérabilité entre deux systèmes d'information SI_1 et SI_2.

Le processus d'évaluation requiert l'acquisition en entrée de l'ensemble des relations sémantiques R_c^j pour en déduire, à la sortie du processus, les métriques $\nu_{i\to j}, \varepsilon_{i\to j}$,

$v_{i\to j}^{e}$ et $\varepsilon_{i\to j}^{e}$ (Section 3.1) permettant d'évaluer l'interopérabilité potentielle maximale et effective minimale.

II. **Niveau 2** : Evaluation de l'interopérabilité entre un ou plusieurs sous-systèmes de SI_1 et le système d'information SI_2 lorsqu'il y a interopérabilité partielle entre SI_1 et SI_2 (Niveau 1).

Ce processus d'évaluation se base sur l'identification des blocs sémantiques déterminés dans le chapitre 3. En effet, chaque bloc sémantique permet d'identifier la sémantique obligatoire minimale pour chaque sous-système qui est indépendante des autres sous-systèmes.

Ainsi, lorsque l'interopérabilité entre les deux systèmes d'information est partielle, il est intéressant de considérer l'interopérabilité entre les sous-systèmes, par exemple, entre SI_1 et ss_i^2 (voir Figure 42) et évaluer alors si elle est totale, partielle ou inexistante.

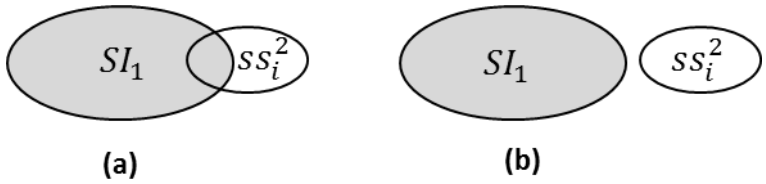


Figure 42. Deux configurations possibles (interopérabilité partielle (a) et non-interopérabilité totale (b)) entre un sous-système ss_i^2 de SI_2 et le système SI_1.

3.2.2. Avantages de l'évaluation de l'interopérabilité des sous-systèmes

Dans le cas où l'interopérabilité entre SI_1et SI_2 est partielle, il est intéressant pour l'entreprise d'étudier l'interopérabilité entre les sous-systèmes et ceci à travers l'évaluation de l'interopérabilité entre le système SI_1 et un ou plusieurs **sous-systèmes de** SI_2. Ceci permet alors d'identifier quelques sous-systèmes qui sont totalement interopérables bien que leurs **sur-systèmes** ne le sont qu'en partie seulement.

L'évaluation de l'interopérabilité des systèmes d'information à travers l'évaluation de leurs sous-systèmes, vue sous cet angle, se base donc sur l'étude des relations sémantiques entre les blocs sémantiques qui contiennent toute la sémantique des sous-systèmes associés.

L'évaluation de l'interopérabilité des sous-systèmes peut être conduite selon différents niveaux de granularité correspondant aux niveaux d'imbrication des blocs sémantiques considérés.

3.2.3. Formalisation de la relation sémantique entre les blocs sémantiques

Dire que SI_1 (voire un ou plusieurs de ces sous-systèmes) est totalement interopérable avec SI_2 implique que SI_1 est interopérable avec chaque sous-système ss_i^2 de SI_2 associé au bloc sémantique $SB(c_i^2)$, relatif au concept c_i^2 (appartenant à l'ensemble des blocs sémantiques noté SB_{SI_2}). Ceci implique qu'il existe, pour chaque concept c_j^2 appartenant à $SB(c_i^2)$, une relation sémantique $R_{c_j}^2 = \langle c_j^2, \left(c_{q_1}^1, \dots, c_{q_p}^1\right)\rangle$ reliant c_j^2 avec un ou plusieurs concepts de C_{SI_1}, qui sont eux-mêmes contenus dans un ou plusieurs blocs sémantiques $SB(c_k^1)$, de SI_1.

Finalement, on peut définir des relations sémantiques entre le bloc $SB(c_i^2)$ et les blocs $SB(c_k^1)$ identifiés par la relation sémantique $R_{c_j}^2 = \langle c_j^2, \left(c_{q_1}^1, \dots, c_{q_p}^1\right)\rangle$ (voir Figure 43). On propose donc de définir une relation binaire entre blocs sémantiques dénotée $\mathcal{R}_{SB}^2$ et associée à son graphe R_{SB}^2 définissant l'ensemble des relations sémantiques entre blocs sémantiques qui peuvent être déduites par l'analyse des relations de R_c^2.

Nous considérons, pour la définition de cet ensemble R_{SB}^2, l'ensemble de l'information minimale obligatoire de SI_2 (CSI_2) et donc uniquement l'ensemble des blocs sémantiques associés à des concepts obligatoires que l'on note $SB_{SI_2}(MNLC)$ et de l'autre côté, la totalité de la sémantique de SI_1 donc l'ensemble des blocs sémantiques que l'on note SB_{SI_1}. Ceci se justifie, comme pour la définition de R_c^2, par le fait que la réalisation des propriétés (P2) et (P3) (section 1.1) nécessite l'étude de la totalité de la connaissance centrale de SI_2 uniquement, étant donné que les concepts non obligatoires ne sont pas nécessaires pour que l'interopération de SI_1 à SI_2 se réalise.

$\mathcal{R}_{SB}^2$, si elle existe, est une relation binaire telle que $\mathcal{R}_{SB}^2 \subseteq SB_{SI_2}(MNLC) \times \mathrm{P}\left(SB_{SI_1}\right)$, où $SB_{SI_2}(MNLC)$ et SB_{SI_2} sont respectivement l'ensemble des blocs sémantiques de SI_2 associés à des concepts obligatoires et l'ensemble des blocs sémantiques de SI_1 et $\mathrm{P}\left(SB_{SI_1}\right)$ est l'ensemble des t-uplets $\left(SB^1\left(c_{q_1}^1\right), \dots, SB^1\left(c_{q_t}^1\right)\right)$ formés à partir des éléments de SB_{SI_1}, avec $t \in \{1, \dots, \mathrm{u}_1\}$ et $\mathrm{u}_1 = \left| SB_{SI_1} \right|$.

R_{SB}^2 est aussi le graphe de la relation binaire $\mathcal{R}_{SB}^2$, formellement défini par :

$$R_{SB}^2 = \left\{ R_{SB_i}^2 = \langle SB^2(c_i^2), \left(SB^1\left(c_{q_1}^1\right), \dots, SB^1\left(c_{q_t}^1\right)\right)\rangle \,\middle|\, (1) \wedge (2) \wedge (3) \right\}$$

Avec :

$$(1) \equiv SB^2(c_i^2) \in SB_{SI_2}(MNLC)$$

$$(2) \equiv \left(SB^1(c_{q_1}^1), \dots, SB^1(c_{q_t}^1)\right) \in \mathrm{P}\left(SB_{SI_1}\right)$$

$$(3) \equiv \left(\forall c_k^2 \in SB^2(c_i^2), \exists R_{c_k}^2 = \langle c_k^2, (c_{p_1}^1, \dots, c_{p_k}^1)\rangle \in R_c^2 \middle| (4)\right)$$

$$(4) \equiv \left(\exists (p,q) \in \{p_1, \dots, p_k\} \times \{q_1, \dots, q_j\} \middle| c_p^1 \in SB^1(c_q^1)\right)$$

$\langle SB^2(c_i^2), \left(SB^1(c_{q_1}^1), \dots, SB^1(c_{q_t}^1)\right)\rangle$ est lu $SB^2(c_i^2)$ est sémantiquement subsumé par $\left(SB^1(c_{q_1}^1), \dots, SB^1(c_{q_t}^1)\right)$.

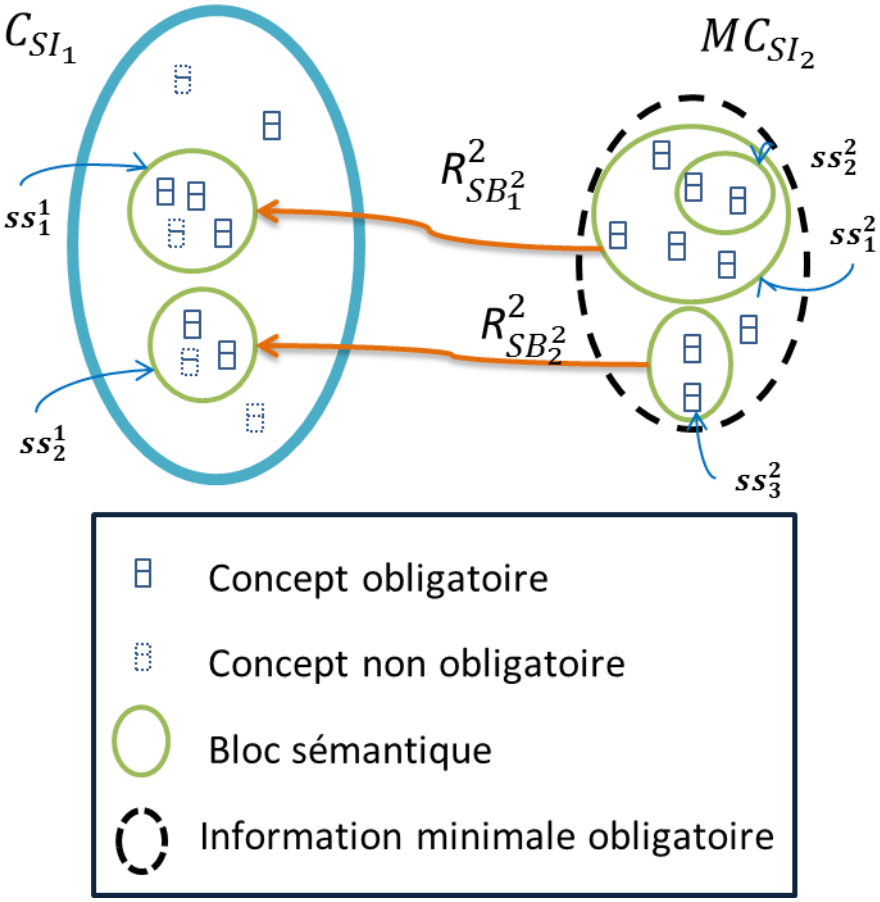


Figure 43. Les relations sémantiques entre les blocs sémantiques se basant sur la Figure 17

3.2.4. Généralisation des métriques d'évaluation de l'interopérabilité

Un sous-système peut alors être considéré comme un système en soi, les métriques formelles que nous avons proposées dans la section 3.2.1 de ce chapitre restent donc, dans ce cas, valables et applicables.

Si nous considérons l'évaluation de l'interopérabilité de SI_1 vers SI_2, nous sommes amenés à déterminer des métriques d'interopérabilité correspondants à chacun des sous-systèmes de SI_2.

Si nous évaluons, par exemple, l'interopérabilité entre SI_1 et un sous-système ss_i^2 tel que $SB^2(c_i^2)$ définit la sémantique minimale obligatoire de ss_i^2, nous allons déterminer des métriques d'interopérabilité associées à ce sous-système. En généralisant, nous allons considérer le bloc sémantique $SB^2(c_i^2)$ comme une boîte blanche et nous nous restreignons à l'analyse de l'ensemble des relations sémantiques des concepts du bloc, que l'on notera $R_c^2(ss_i^2)$.

Deux cas de figures se présentent :

1. Si $\forall c_k^2 \in SB^2(c_i^2), \nexists R_{c_k}^2 \in R_c^2(ss_i^2)$ alors $R_{SB_i}^2$ n'existe pas et donc SI_1 et ss_i^2 ne sont pas interopérables.
2. Si $\exists c_k^2 \in SB^2(c_i^2) \mid \exists R_{c_k}^2 \in R_c^2(ss_i^2)$ alors $R_{SB_i}^2$ existe (voir Figure 44).

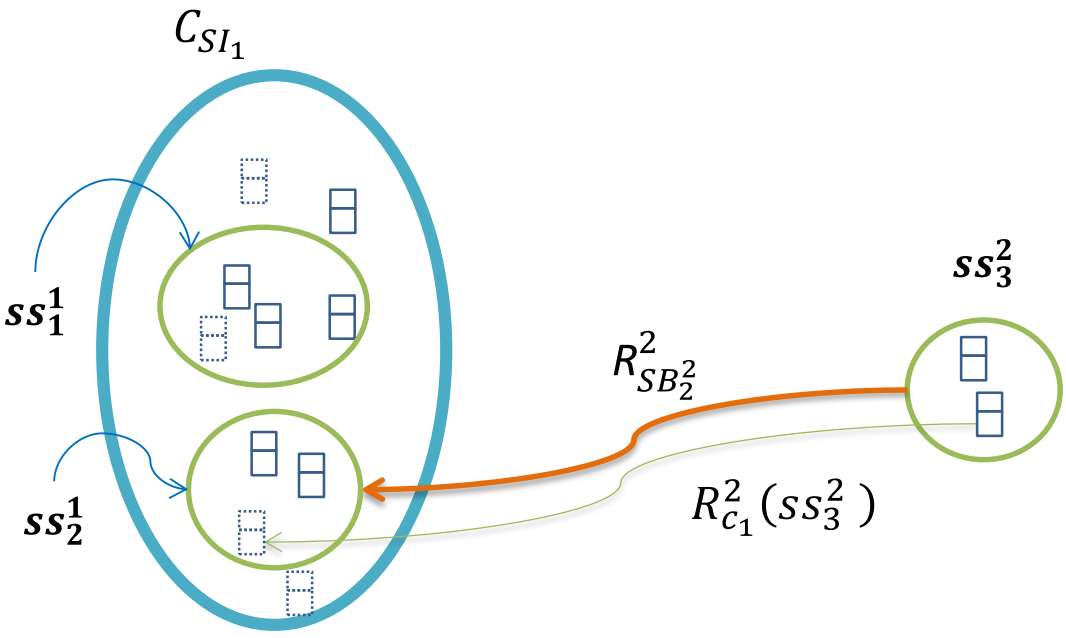


Figure 44. Évaluation de l'interopérabilité entre SI_1 et un sous-système SI_2

Nous pouvons généraliser les métriques proposées dans la section 3.1 pour évaluer l'interopérabilité de SI_1 à ss_i^2. Il en résulte les quatre métriques généralisées suivantes (voir Figure 44) :

1. $\nu_{1\to ss_i^2} = \frac{|R_c^2(ss_i^2)|}{|R_{c_{expected}}^2(ss_i^2)|}$ pour évaluer l'interopérabilité potentielle de SI_1 à ss_i^2.
2. $\varepsilon_{1\to ss_i^2} = \frac{|R_c^{2e}(ss_i^2)|}{|R_c^2(ss_i^2)|}$ pour évaluer l'effectivité associée à l'interopérabilité potentielle de SI_1 à ss_i^2.
3. $\nu^e_{1\to ss_i^2} = \frac{|R_c^{2e}(ss_i^2)|}{|R^2_{c_{expected}}(ss_i^2)|}$ pour évaluer l'interopérabilité effective de SI_1 à ss_i^2.
4. $\varepsilon^e_{1\to ss_i^2} = \frac{|R_c^{2e}(ss_i^2)|}{|R_c^{2e}(ss_i^2)|} = 100\%$ pour évaluer l'effectivité associée à l'interopérabilité effective de SI_1 à ss_i^2.

Ces métriques permettent d'associer un degré d'interopérabilité à chaque relation sémantique $R^2_{SB_i}$ qui a pu être identifiée (voir Figure 45).

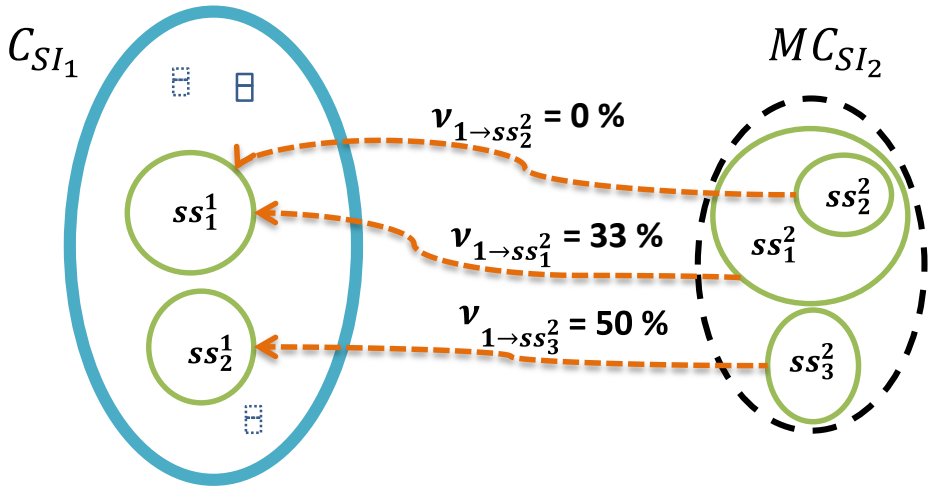


Figure 45. Les métriques ν déterminées pour chacun des sous-systèmes de CSI_2

Il serait naturel de vouloir relier l'ensemble des mesures obtenues pour chacun des sous-systèmes avec la mesure obtenue au niveau système (obtenir $\nu_{1\to 2} = f\left(\nu_{1\to ss_1^2}, \dots, \nu_{1\to ss_N^2}\right)$, avec N le nombre de sous-systèmes de SI_2). Cependant, cette tâche est confrontée à un ensemble de problèmes :

1. Chaque bloc n'a pas le même poids (en terme de nombres de concepts et donc de sémantique véhiculée),
2. Les blocs peuvent être non-disjoints et donc partager une sémantique commune.
3. Les blocs peuvent contenir d'autres blocs et donc subsumer leur sémantique.

Evaluer l'interopérabilité des sous-systèmes est un atout majeur quand on procède à l'étude de l'interopérabilité des systèmes d'informations étant donné qu'il permet de cibler les

sous-systèmes sur lesquels il faut appliquer les stratégies d'amélioration sans se focaliser à les appliquer sur la totalité du système.

4. Conclusion

Le chapitre 3 présente le cœur de notre contribution de thèse dans la mesure où il détaille notre proposition pour évaluer *a priori* l'interopérabilité des systèmes d'information d'entreprises collaboratives vus comme des boîtes blanches. Ceci nous ramène à analyser les modèles conceptuels de ces systèmes d'information et formaliser les relations sémantiques d'interopérabilité entre les différents concepts.

La formalisation des diverses relations sémantiques a permis de proposer des métriques permettant d'évaluer quantitativement et qualitativement le degré d'interopérabilité ou de non interopérabilité entre les modèles conceptuels de systèmes d'information d'entreprises. Ces métriques facilitent l'identification des différentes stratégies d'amélioration à mettre en place pour assurer le niveau désiré d'interopérabilité.

Nous généralisons ces métriques en les appliquant aux sous-systèmes des systèmes d'information afin de détecter les sous-systèmes qui peuvent totalement interopérer et ceux qui interopèrent partiellement ou n'interopèrent pas. Ceci permet de cibler les stratégies d'améliorations à un ou plusieurs sous-systèmes spécifiques sans se préoccuper de l'amélioration du système d'information en entier.

Les hypothèses fortes que nous avons émises pour réaliser ce travail sont :

(H1). Les modèles conceptuels utilisés à l'entrée du processus d'évaluation formalisent la sémantique métier complète des systèmes d'information étudiés.

(H2). La sémantique des systèmes d'information étudiés, dépendante de la connaissance métier de ces systèmes, est garantie par des experts du domaine dont nous ne remettons pas en cause les conclusions.

Chapitre 4 : Prototypage et application à un problème d'interopérabilité B2M

Introduction

Le contexte général de nos travaux de thèse concerne l'étude de l'interopérabilité dans un environnement collaboratif. Ces travaux ont abouti à une approche originale présentée dans le chapitre 3 qui permet d'évaluer l'interopérabilité sémantique de systèmes d'information d'entreprises collaboratives, à travers l'analyse de leurs modèles conceptuels et la définition de métriques appropriées.

Afin d'outiller notre approche, nous proposons, dans ce chapitre, de prototyper celle-ci dans l'environnement de modélisation *MEGA Suite*. Le choix de cet outil s'explique d'abord par l'expertise de notre équipe de recherche dans la manipulation de cet outil, et ensuite par la possibilité offerte par cet outil de modifier son méta-modèle afin de répondre à nos propres exigences d'implémentation. En effet, *MEGA Suite* fournit un méta-modèle commun paramétrable avec un ensemble d'outils de modélisation structuré autour de lui.

Nous cherchons ensuite à valider notre système de mesure sur la base d'un cas d'étude s'inscrivant dans le contexte du pilotage de la production manufacturière. Il s'agit d'un scénario industriel applicatif faisant intervenir des systèmes d'informations du centre technique AIPL-PRIMECA[37] (l'Atelier Inter-établissements de Productique Lorrain).

La première partie de ce chapitre présente le méta-modèle de notre approche d'évaluation que nous avons implémenté dans l'environnement *MEGA Suite* afin d'automatiser la mesure de l'interopérabilité de deux systèmes d'informations donnés, à travers l'analyse de leurs modèles conceptuels préalablement transcrits dans *MEGA Suite*.

Nous proposons, en deuxième partie de ce chapitre, de détailler le cas d'étude en illustrant l'application de l'approche d'explicitation et de structuration de la sémantique des modèles conceptuels telle que présentée dans le chapitre 2. Finalement, nous appliquons nos métriques d'interopérabilité sémantique sur un sous-ensemble de ce cas d'étude pour en déterminer des mesures que nous analysons. Cette analyse se traduit par une cartographie

[37] AIPL-PRIMECA, www.aip-primeca.net/lorraine/

de ces mesures, faisant ainsi émerger différentes stratégies de paramétrage ou de personnalisation des systèmes d'entreprises impliqués.

1. Prototypage de l'approche d'évaluation de l'interopérabilité

1.1. Présentation du méta-modèle

Pour automatiser l'approche d'évaluation de l'interopérabilité sémantique des systèmes d'information, nous avons prototypé un outillage en implémentant le méta-modèle de la Figure 46. Ce méta-modèle représente les concepts utilisés pour l'approche d'évaluation que nous avons proposée : concepts lexicaux et non lexicaux, blocs sémantiques, et les relations sémantiques R_c et R_{SB}, entrées du processus d'évaluation de l'interopérabilité. Elles permettent d'établir les mesures de potentialité et d'effectivité : $\nu_{1\to2}$, $\nu^e_{1\to2}$, $\varepsilon_{1\to2}$ et $\varepsilon^e_{1\to2}$.

R_c, lorsqu'elle existe, est la relation sémantique qui associe, à un concept atomique abstrait, un ou plusieurs autres concepts atomiques abstraits. Un concept atomique peut être soit un concept lexical, soit un concept non lexical. La contrainte « XOR » exprime la non réflexivité de la relation R_c.

Suivant le même raisonnement, la relation sémantique R_{SB}, lorsqu'elle existe, associe, à un bloc sémantique, un ou plusieurs blocs sémantiques. La contrainte « XOR » exprime la non réflexivité de la relation R_{SB}.

L'implémentation de ce méta-modèle dans un environnement de modélisation permet d'éditer les relations sémantiques R_c et R_{SB} et, par la suite, d'automatiser la procédure de calcul des mesures d'interopérabilité afin d'en établir leur cartographie.

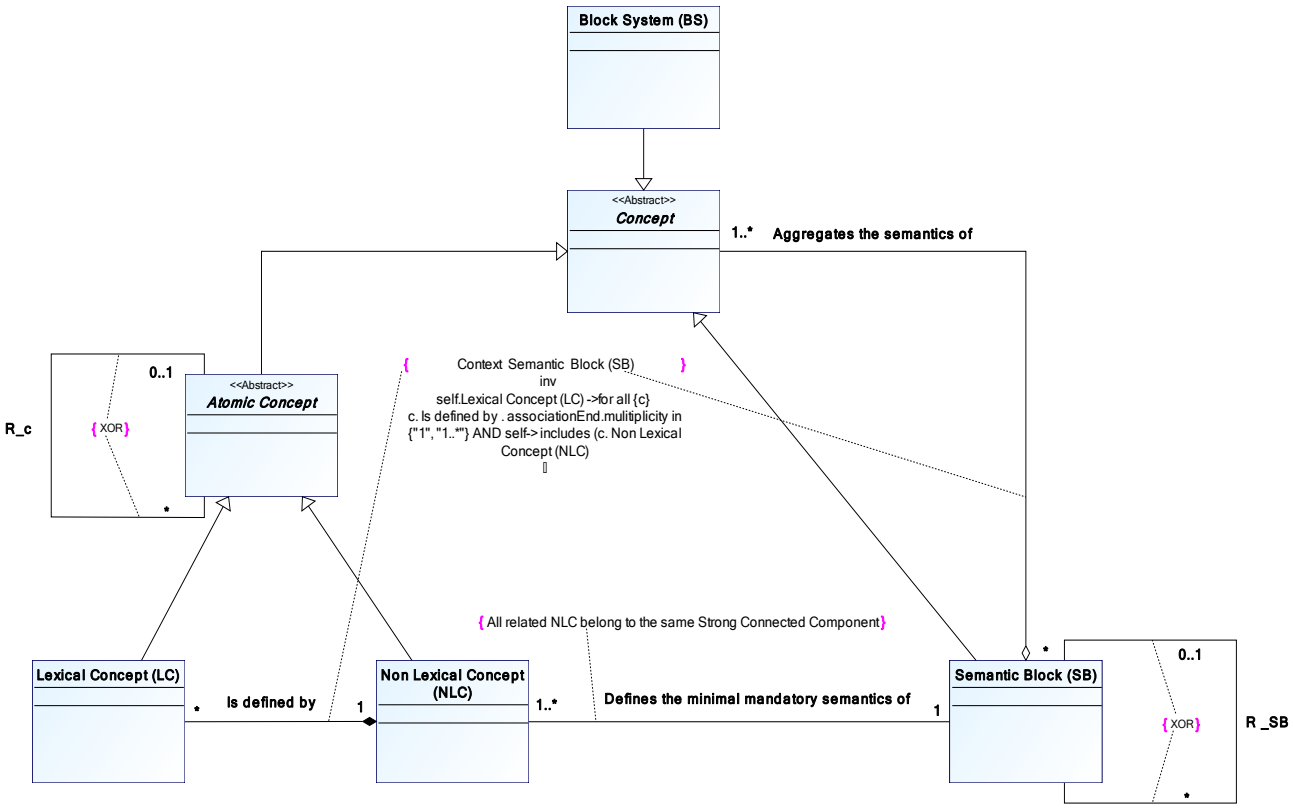


Figure 46 .Méta-modèle de notre approche d'évaluation de l'interopérabilité

1.2. Implémentation semi-automatique de l'évaluation de l'interopérabilité

En nous basant sur l'implémentation du méta-modèle dans *MEGA Suite*, nous avons proposé un prototype pour aider l'expert dans l'évaluation de l'interopérabilité de systèmes d'information d'entreprise. *MEGA Suite* nous offre ainsi la possibilité de semi-automatiser notre approche d'évaluation en dérivant le méta-modèle de notre approche au sein du méta-modèle initial de *MEGA Suite* pour :

1. générer automatiquement les blocs sémantiques grâce à un script développé en Visual Basic (VB) (le langage proposé par *MEGA Suite*). Ce processus de génération a pour entrées les modèles conceptuels des systèmes d'information étudiés et produit un ensemble de paquetages stéréotypés, représentatifs des blocs sémantiques identifiés ;
2. générer les relations d'interopérabilité sémantiques R_c et R_{SB} grâce à un script VB qui interroge les experts du domaine pour établir les correspondances sémantiques

entre tuples de concepts. Les relations R_{SB}, entre blocs sémantiques, sont alors déduites automatiquement ;

3. calculer les mesures d'interopérabilité $\nu_{1\to2}$, $\nu^{e}_{1\to2}$, $\varepsilon_{1\to2}$ et $\varepsilon^{e}_{1\to2}$ par un script VB ;
4. générer la cartographie des mesures d'interopérabilité.

2. Cas d'étude : Processus d'achat de la matière première à l'AIPL-PRIMECA

2.1. Présentation du cas d'étude

Pour valider notre approche d'évaluation du degré d'interopérabilité dans un contexte industriel, nous avons choisi un cas d'étude qui met en évidence deux systèmes d'information différents qui doivent interopérer pour assurer le processus d'approvisionnement en matière première au centre technique AIPL-PRIMECA. Il s'agit de l'ERP Sage X3[38] qui coopère avec le MES Flexnet Apriso[39] pour assurer la fabrication d'une famille de produits.

De tels systèmes d'information d'échelle industrielle sont architecturés autour d'un système de gestion de base de données relationnelle, qui comprend une multitude de tables et de relations. Flexnet, par exemple, détient environ 800 tables avec 300 clés étrangères et la conceptualisation de ses modèles fait émerger environ 600 concepts et 500 associations.

L'ERP assure la planification à long terme en spécifiant, pendant une période donnée, les besoins en termes de matières premières, pour ensuite lancer des bons de commande. Ces derniers sont transférés de l'ERP au MES. Un rapport contenant l'état des stocks ainsi que le statut des ordres d'achat est ensuite retourné du MES à l'ERP.

Pour la suite de notre étude, nous considérons uniquement les sous-ensembles du MES Flexnet (SI_1) et de l'ERP Sage X3 (SI_2), qui sont concernées par l'approvisionnement en matière première mais nous continuerons, par besoin de simplification, à parler de Flexnet et Sage X3.

2.2. Approche d'explicitation et de structuration de la sémantique des systèmes d'information

2.2.1. Approche d'explicitation de la sémantique

L'apport de l'approche d'explicitation de la sémantique des systèmes d'information est d'obtenir un modèle conceptuel normé et enrichi. Ce modèle est par la suite analysé pour permettre la structuration de la sémantique sous formes de blocs sémantiques (Chapitre 2).

[38] http://www.sage.fr/mge/logiciels-erp
[39] http://www.apriso.com/products/overview.php

Nous présentons dans cette partie du manuscrit de thèse, l'application de cette approche pour la mise en évidence des modèles conceptuels normés et enrichis pour l'ERP Sage X3 et le MES Flexnet ainsi que la détermination de leurs blocs sémantiques.

Il est à noter que nous ne disposons pas du modèle conceptuel initial de Flexnet et de Sage X3, ce qui nous a amené à avoir recours à la rétro-ingénierie (dans *MEGA Suite*) pour obtenir les deux modèles conceptuels bruts. La Figure 47 représente le modèle conceptuel du processus de l'émission du bon de commande déclenché au niveau de Flexnet pour l'achat de la matière première. La Figure 48 représente le modèle conceptuel correspondant de Sage X3.

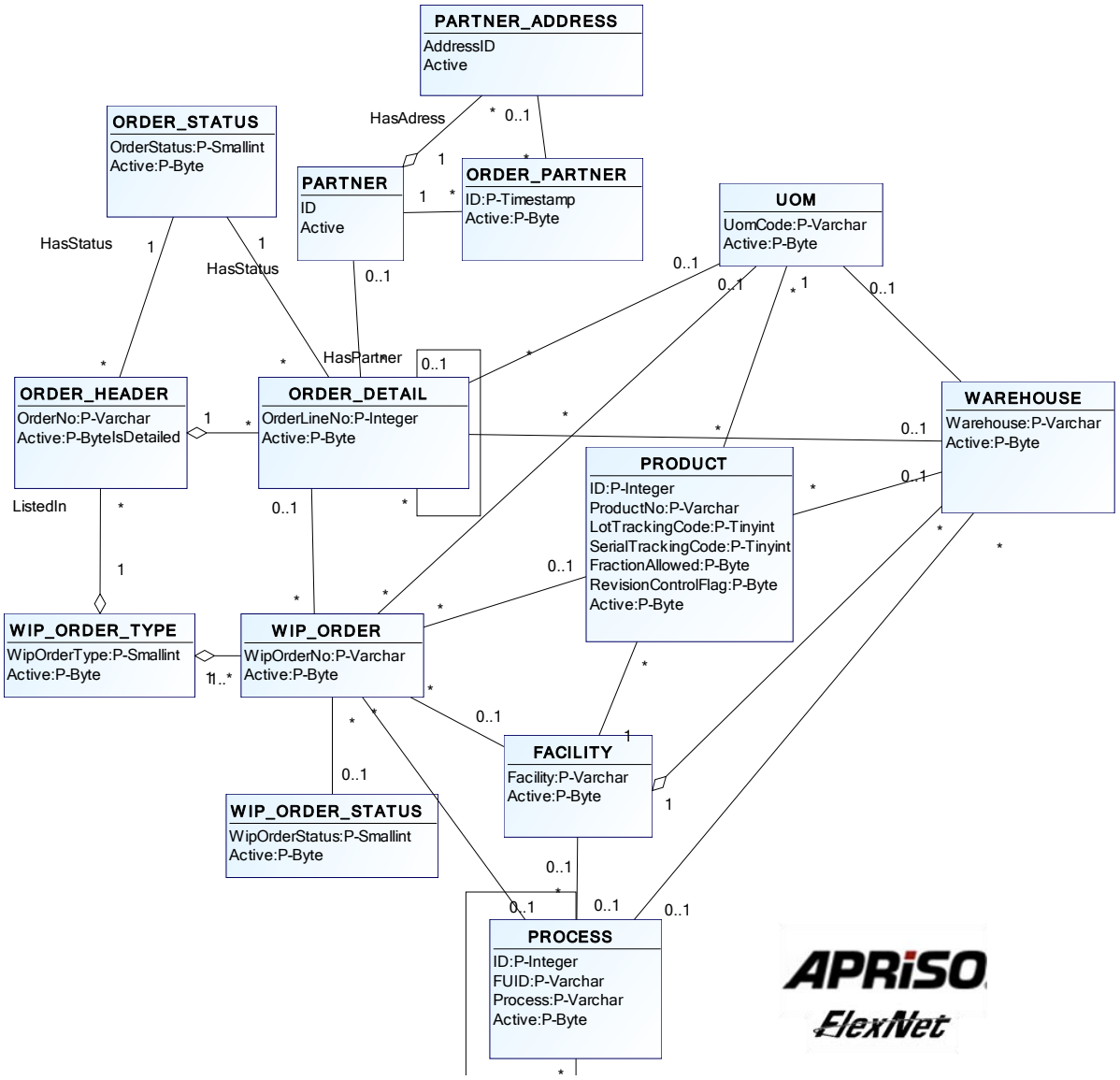


Figure 47. Modèle conceptuel de Flexnet pour l'enregistrement, l'exécution et le suivi du bon de commande

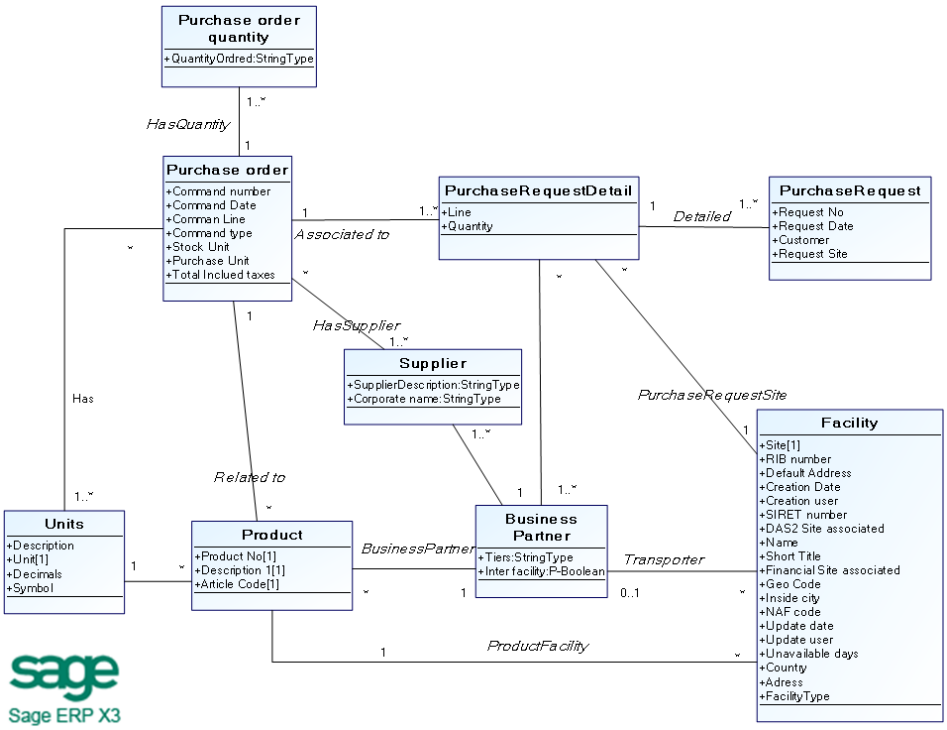


Figure 48. Modèle conceptuel de Sage X3 pour l'élaboration du bon de commande

A partir de ces modèles conceptuels, l'étape suivante de notre approche consiste en l'analyse de leur sémantique intrinsèque en identifiant et en supprimant tout artefact lié à l'implémentation, source de « bruit ». En effet, les données, tables et relations utiles pour optimiser l'implémentation ne véhiculent aucune sémantique utile à notre analyse. Ce modèle est ensuite complété (en particulier par des contraintes) en y injectant la sémantique apportée par les parties prenantes (utilisateurs et experts) à travers les bonnes pratiques de l'entreprise (voir chapitre 2). Par exemple, la multiplicité de deux rôles d'associations du modèle conceptuel de Flexnet de la Figure 47 ont été modifiées par les experts dans le modèle de la Figure 50 pour passer d'une multiplicité de 0..1 à 1, ceci concerne les associations entre les classes UOM et PRODUCT et puis entre WIP_ORDER et WIP_ORDER_STATUS.

Les modèles conceptuels enrichis de Flexnet et Sage X3 sont ensuite transformés selon la perspective « fact-oriented modelling» (Yahia, Lezoche, et al. 2011) et (Yahia, Aubry et Panetto 2011) tout en utilisant les notations UML (voir chapitre 2). L'approche présentée dans le chapitre 2 et appliquée ici (sans en donner les détails puisqu'elle n'est pas le cœur des travaux de cette thèse) permet de produire des modèles conceptuels enrichis et normés ayant une sémantique bien explicitée. Le modèle conceptuel enrichi et normé de Flexnet est donné dans la Figure 49 et celui de Sage X3 est donné dans la Figure 50. La génération automatique de ces modèles est élaborée avec l'environnement *MEGA Suite* au travers de différents scripts VB développés au sein de notre équipe de recherche.

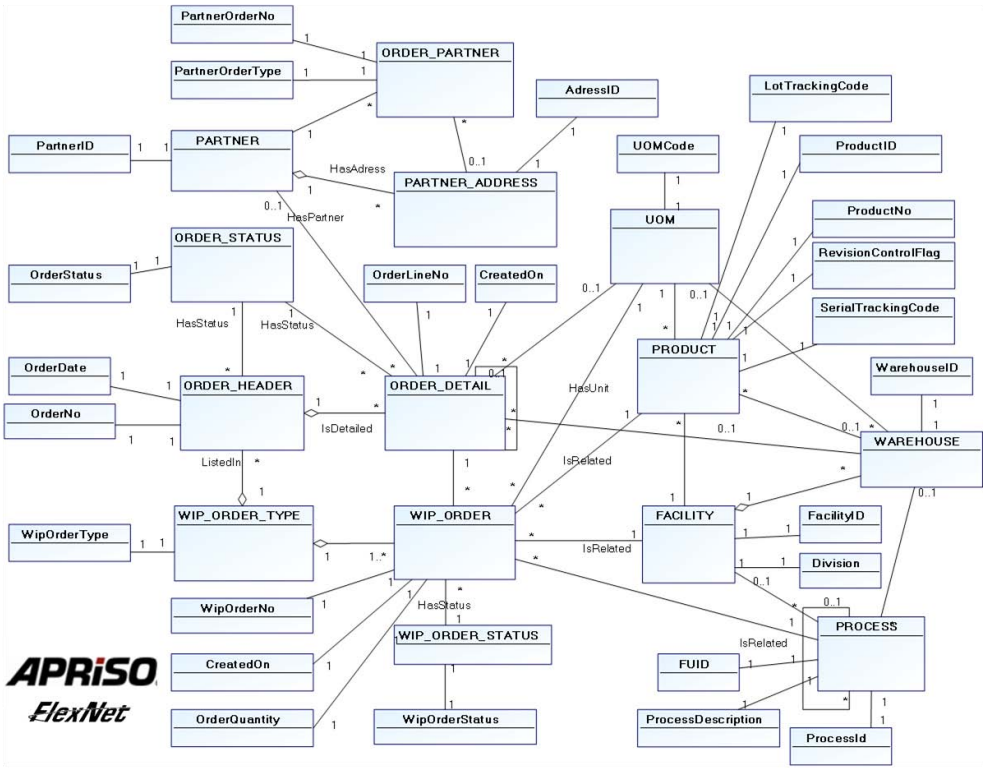


Figure 49. Modèle conceptuel de Flexnet enrichi et normé selon la perspective « fact-oriented modelling »

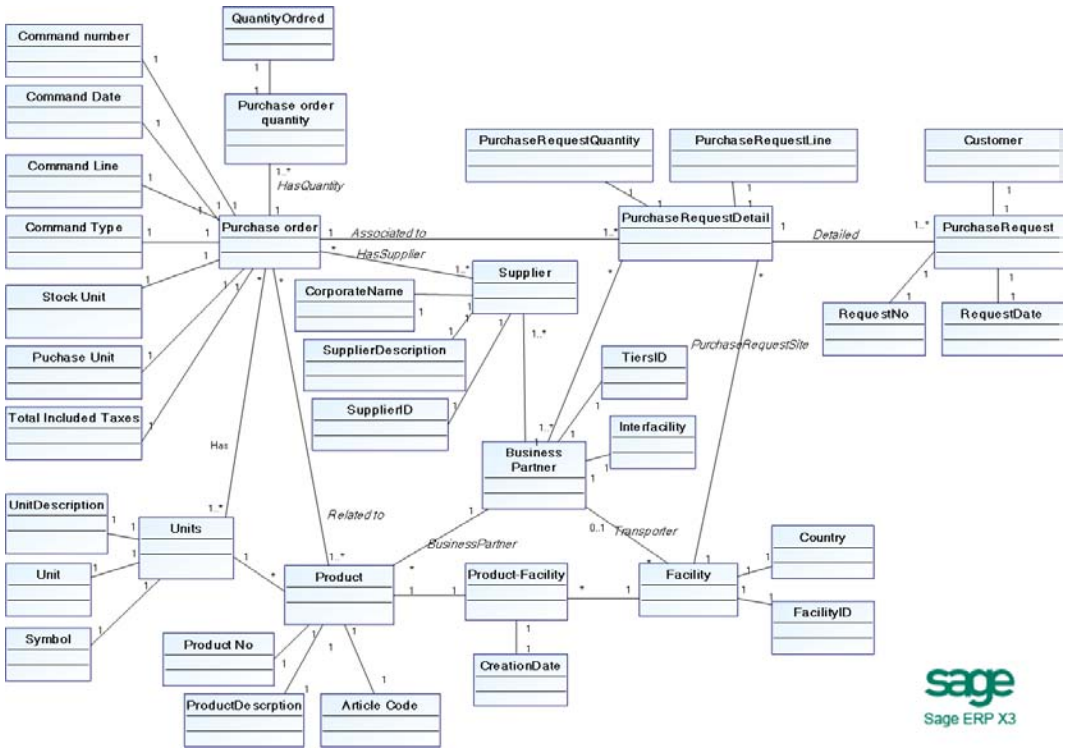


Figure 50. Modèle conceptuel de SAGE X3 enrichi et normé selon la perspective « fact-oriented modelling »

2.2.2. Approche de structuration de la sémantique

Pour structurer la sémantique des modèles conceptuels de l'ERP et du MES sous forme de blocs sémantiques, nous appliquons la procédure présentée dans la section 3.3 du chapitre 2. Cette procédure a été implémentée dans *MEGA Suite* à l'aide de scripts VB, et nous générons alors automatiquement l'ensemble des blocs sémantiques correspondants à chacun des modèles conceptuels enrichis et normés.

Par ailleurs, un diagramme de paquetage UML, généré automatiquement dans *MEGA Suite*, permet de représenter l'ensemble des blocs sémantiques du modèle conceptuel du MES Flexnet (Figure 51) et de l'ERP Sage X3. Ces diagrammes permettent de mettre en évidence les relations entre blocs sémantiques. De plus, un diagramme de classe UML est également généré automatiquement pour chaque bloc sémantique : il représente la restriction du modèle conceptuel complet aux concepts contenus dans le bloc sémantique. Par exemple, nous représentons dans la Figure 52, le diagramme de classe associé au bloc sémantique $B(PRODUCT)$ du concept $PRODUCT$. Ce modèle inclut ainsi tous les concepts exigés pour exprimer la sémantique minimale obligatoire du concept $PRODUCT$.

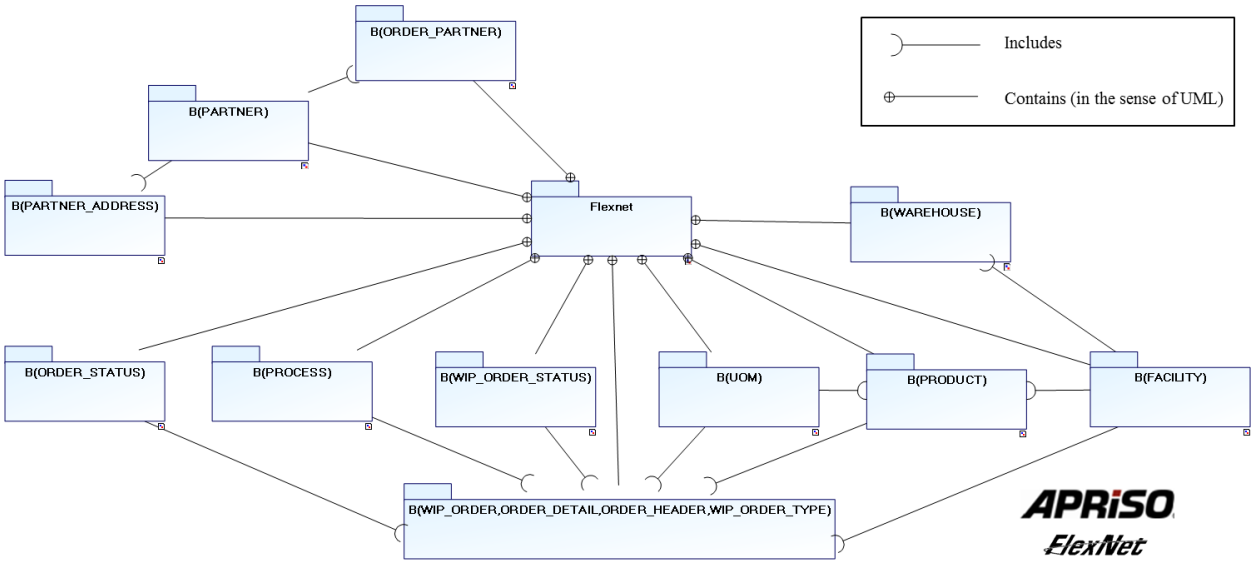


Figure 51. Les blocs sémantiques identifiés dans le modèle conceptuel de Flexnet de la Figure 49.

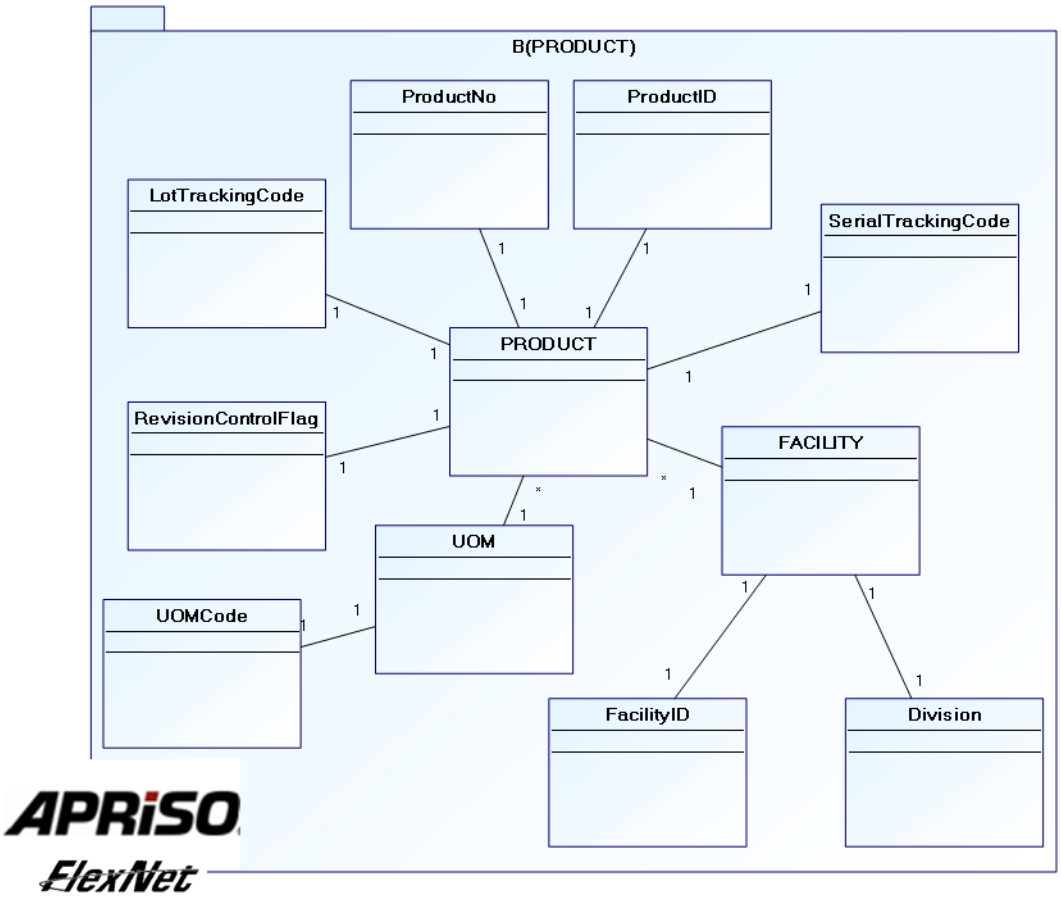


Figure 52. Le modèle conceptuel associé au bloc sémantique $B(PRODUCT)$

Les Tableau 7 et Tableau 8 listent l'ensemble des blocs sémantiques liés respectivement à Flexnet et Sage X3, identifiés automatiquement par l'exécution du script VB implémenté dans *Mega Suite*.

Tableau 7.Les blocs sémantiques de Flexnet (SI_1)

Blocs Sémantiques de Flexnet (SI_1)	***Concepts***
$SB_1^1(\text{WAREHOUSE})$	WAREHOUSE, WarehouseID, FACILITY, FacilityID, Division
$SB_2^1(\text{ORDER_PARTNER})$	ORDER_PARTNER, PartnerOrderNo, PartnerOrderType, PARTNER, PartnerID
$SB_3^1(\text{PARTNER_ADDRESS})$	PARTNER_ADDRESS, AdressID, PARTNER, PartnerID
$SB_4^1(\text{PARTNER})$	PARTNER, PartnerID

SB_5^1(WIP_ORDER)= SB_6^1(ORDER_DETAIL)= SB_7^1(ORDER_HEADER)= SB_8^1(WIP_ORDER_TYPE)	WIP_ORDER, WipOrderNo, CreatedOn, OrderQuantity, WIP_ORDER_TYPE, WipOrderType, ORDER_DETAIL, OrderLineNo, CreatedOn, ORDER_HEADER, OrderDate, OrderNo, WIP_ORDER_STATUS, WipOrderStatus, PROCESS, ProcessId, ProcessDescription, FUID, FACILITY, FacilityId, Division, PRODUCT, LotTrackingCode, ProductId, ProductNo, RevisionControlFlag, SerialTrackingCode, UOM, UOMCode, ORDER_STATUS, OrderStatus
SB_9^1(PROCESS)	PROCESS, ProcessId, ProcessDescription, FUID
SB_{10}^1(PRODUCT)	PRODUCT, LotTrackingCode, ProductId, ProductNo, RevisionControlFlag, SerialTrackingCode, UOM, UOMCode, FACILITY, FacilityId, Division,
SB_{11}^1(UOM)	UOM, UOMCode
SB_{12}^1(WIP_ORDER_STATUS)	WIP_ORDER_STATUS, WipOrderStatus
SB_{13}^1(FACILITY)	FACILITY, FacilityId, Division,
SB_{14}^1(ORDER_STATUS)	ORDER_STATUS, OrderStatus

Tableau 8. Les blocs sémantiques de Sage X3 (SI_2)

Blocs Sémantiques de Sage X3 (SI_2)	***Concepts***
SB_1^2(Purchase order)= SB_2^2(Purchase order quantity)= SB_3^2(PurchaseRequestDetail)= SB_4^2(PurchaseRequest) = SB_5^2(PurchaseorderStatus)	Purchase order, Purchase order quantity, QuantityOrdred, PurchaseRequestDetail, PurchaseRequestQuantity, PurchaseRequestLine, PurchaseRequest, Customer, RequestNo, RequestDate, Supplier, SupplierID, BusinessPartner, CorporateName, SupplierDescription, Tiers, Interfacility, Facility, Country, FacilityID, Units, UnitDescription, Unit, Symbol, Product, ProductNo, ProductDescription, Article Code, ProductFacility, CreationDate, Command number, Command Date, Command Line, Command Type, Stock Unit, Purchase Unit, Total Included Taxes, Units, UnitDescription, Unit, Symbol
SB_6^2(Supplier)= SB_7^2(BusinessPartner)	Supplier, SupplierID, BusinessPartner, CorporateName, SupplierDescription, Tiers, Interfacility
SB_8^2(Facility)	Facility, Country, FacilityID
SB_9^2(Units)	Units, UnitDescription, Unit, Symbol
SB_{10}^2(Product)= SB_{11}^2(ProductFacility)	Product, ProductNo, ProductDescription, Article Code, ProductFacility, CreationDate, Supplier, SupplierID, BusinessPartner, CorporateName, SupplierDescription, Tiers, Interfacility, Facility, Country, FacilityID, Units, UnitDescription, Unit, Symbol

3. Approche de formalisation et d'évaluation de l'interopérabilité des systèmes d'information

Dans cette section, nous allons étudier la formalisation et puis l'évaluation des relations sémantiques entre le MES Flexnet (SI_1) et l'ERP Sage X3 (SI_2).

Rappelons qu'évaluer l'interopérabilité entre les systèmes d'information consiste à étudier l'interopérabilité selon les directions suivantes :

1. De SI_1 vers SI_2 : nous avons alors besoin d'identifier R_c^2 .
2. De SI_2 vers SI_1: nous avons alors besoin d'identifier R_c^1 .

3.1. Identification des relations d'interopérabilité R_c

Les experts du domaine identifient l'ensemble des relations sémantiques R_c^1 et R_c^2 (où les concepts obligatoires sont représentés en **gras**) avec :

$$R_c^1 = \left\{ \begin{array}{c} \langle \boldsymbol{WIP_ORDER}, (\boldsymbol{PurchaseRequestDetail}, \boldsymbol{PurchaseRequest}) \rangle, \langle \boldsymbol{WipOrderNo}, (\boldsymbol{RequestNo}) \rangle, \\ \langle \boldsymbol{CreatedOn}, (\boldsymbol{RequestDate}) \rangle, \langle \boldsymbol{OrderQuantity}, (\boldsymbol{PurchaseOrder}) \rangle, \\ \langle \boldsymbol{ORDER-DETAIL}, (\boldsymbol{PurchaseRequestQuantity}) \rangle, \langle \boldsymbol{OrderLineNo}, (\boldsymbol{CommandLineNo}) \rangle, \\ \langle \boldsymbol{ORDER-HEADER}, (\boldsymbol{PurchaseOrder}) \rangle, \langle \boldsymbol{OrderDate}, (\boldsymbol{CommandDate}) \rangle, \\ \langle \boldsymbol{OrderNo}, (\boldsymbol{CommandNumber}) \rangle, \langle \boldsymbol{UOM}, (\boldsymbol{Units}) \rangle, \langle \boldsymbol{UOMcode}, (\boldsymbol{Unit}) \rangle, \\ \langle \boldsymbol{FACILITY}, (\boldsymbol{Facility}) \rangle, \langle \boldsymbol{FacilityID}, (\boldsymbol{FacilityID}) \rangle, \langle \boldsymbol{Division}, (\boldsymbol{FacilityType}) \rangle, \\ \langle \boldsymbol{PARTNER-ADRESS}, (\boldsymbol{Facility}) \rangle, \langle \boldsymbol{AdressID}, (\boldsymbol{FacilityID}) \rangle, \\ \langle \boldsymbol{PARTNER}, (\boldsymbol{BusinessPartner}, \boldsymbol{Supplier}) \rangle, \langle \boldsymbol{Partner-ID}, (\boldsymbol{TiersID}, \boldsymbol{SupplierID}) \rangle, \\ \langle \boldsymbol{WarehouseID}, (\boldsymbol{FacilityID}) \rangle, \langle \boldsymbol{Warehouse}, (\boldsymbol{FACILITY}, \boldsymbol{ProductFacility}) \rangle, \\ \langle \boldsymbol{PartnerOrderType}, (\boldsymbol{SupplierDescription}) \rangle, \langle \boldsymbol{ORDER-PARTNER}, (\boldsymbol{BusinessPartner}, \boldsymbol{Supplier}) \rangle \\ \langle \boldsymbol{ORDER-STATUS}, (PurchaseOrderStatus) \rangle, \langle \boldsymbol{OrderStatus}, (PurchaseOrderStatus) \rangle \\ \langle \boldsymbol{PRODUCT}, (\boldsymbol{Product}) \rangle, \langle \boldsymbol{ProductNo}, (\boldsymbol{Product\ No}) \rangle, \langle \boldsymbol{ProductID}, (\boldsymbol{Article\ Code}) \rangle \end{array} \right\}$$

Et

$$R_c^2 = \left\{ \begin{array}{c} \langle \boldsymbol{Command\ number}, (\boldsymbol{orderNo}) \rangle, \langle \boldsymbol{Command\ Date}, (\boldsymbol{CreatedOn}) \rangle, \\ \langle \boldsymbol{Command\ Line}, (\boldsymbol{OrderLineNo}) \rangle, \langle \boldsymbol{stock\ Unit}, (\boldsymbol{UOMCode}) \rangle, \langle \boldsymbol{PurchaseUnit}, (\boldsymbol{UOMCode}) \rangle, \\ \langle \boldsymbol{PurchaseOrderQuantity}, (\boldsymbol{Orderdetail}) \rangle, \langle \boldsymbol{QuantityOrdred}, (\boldsymbol{QuantityOrder}) \rangle, \langle \boldsymbol{Units}, (\boldsymbol{UOM}) \rangle, \\ \langle \boldsymbol{Unit}, (\boldsymbol{UOMCode}) \rangle, \langle \boldsymbol{UnitDescription}, (UOMtext) \rangle, \langle \boldsymbol{Symbol}, (UnitOFMeasure) \rangle, \\ \langle \boldsymbol{Product}, (\boldsymbol{Product}) \rangle, \langle \boldsymbol{ProductNo}, (\boldsymbol{ProductNo}) \rangle, \langle \boldsymbol{ArticleCode}, (\boldsymbol{ProductID}) \rangle, \\ \langle \boldsymbol{ProductDescription}, (ProductText) \rangle, \langle \boldsymbol{Facility}, (\boldsymbol{Facility}, \boldsymbol{Warehouse}) \rangle, \langle \boldsymbol{FacilityID}, (\boldsymbol{FacilityID}) \rangle, \\ \langle \boldsymbol{PurchaseRequest}, (\boldsymbol{Wip\text{-}Order}) \rangle, \langle \boldsymbol{RequestNo}, (\boldsymbol{WipOrderNo}) \rangle, \\ \langle \boldsymbol{RequestDate}, (\boldsymbol{CreatedOn}) \rangle, \langle \boldsymbol{Customer}, (RessourceType) \rangle \\ \langle \boldsymbol{PurchaseRequestDetail}, (\boldsymbol{Wip\text{-}Order}) \rangle, \langle \boldsymbol{PurchaseRequestQauntity}, (\boldsymbol{OrderQuantity}) \rangle, \\ \langle \boldsymbol{BusinessPartner}, (\boldsymbol{Partner}, \boldsymbol{Partner\text{-}Adress}) \rangle, \langle \boldsymbol{TiersID}, (\boldsymbol{PartnerId}) \rangle, \langle \boldsymbol{Interfacility}, (\boldsymbol{AdresseID}) \rangle \\ \langle \boldsymbol{Supplier}, (\boldsymbol{Order\text{-}Partner}) \rangle, \langle \boldsymbol{SupplierID}, (\boldsymbol{PartnerID}) \rangle, \\ \langle \boldsymbol{SupplierDescription}, (\boldsymbol{PartnerOrderType}) \rangle, \langle \boldsymbol{CorporateName}, (DomainManager) \rangle \end{array} \right\}$$

Après analyse de R_c^1, on peut remarquer que les relations sémantiques n'ont pas pu être identifiées pour les concepts suivants : *WIP_ORDER_TYPE, WipOrderType, WIP_ORDER_STATUS, WipOrderStatus, CreatedOn, PartnerOrderNo, FUID, ProcessDescription, RevisionControlFlag, SerialTrackingCode, LotTrackingCode, PROCESS, ProcessId*.

De la même manière, après analyse de R_c^2, on peut remarquer que les relations sémantiques n'ont pas pu être identifiées pour les concepts suivants : *Command Type, Total Included Taxes, Purchase Order, Product-Facility, CreationDate, PurchaseRequestLine, Country.*

Les relations sémantiques R_c^{1e} et R_c^{2e} sont identifiées comme suit :

$$R_c^{1e} = \left\{ \begin{array}{c} \langle \boldsymbol{WIP_ORDER}, (\boldsymbol{PurchaseRequestDetail}, \boldsymbol{PurchaseRequest}) \rangle, \langle \boldsymbol{WipOrderNo}, (\boldsymbol{RequestNo}) \rangle, \\ \langle \boldsymbol{CreatedOn}, (\boldsymbol{RequestDate}) \rangle, \langle \boldsymbol{OrderQuantity}, (\boldsymbol{PurchaseOrder}) \rangle, \\ \langle \boldsymbol{ORDER-DETAIL}, (\boldsymbol{PurchaseRequestQuantity}) \rangle, \langle \boldsymbol{OrderLineNo}, (\boldsymbol{CommandLineNo}) \rangle, \\ \langle \boldsymbol{ORDER-HEADER}, (\boldsymbol{PurchaseOrder}) \rangle, \langle \boldsymbol{OrderDate}, (\boldsymbol{CommandDate}) \rangle, \\ \langle \boldsymbol{OrderNo}, (\boldsymbol{CommandNumber}) \rangle, \langle \boldsymbol{UOM}, (\boldsymbol{Units}) \rangle, \langle \boldsymbol{UOMcode}, (\boldsymbol{Unit}) \rangle, \\ \langle \boldsymbol{FACILITY}, (\boldsymbol{Facility}) \rangle, \langle \boldsymbol{FacilityID}, (\boldsymbol{FacilityID}) \rangle, \langle \boldsymbol{Division}, (\boldsymbol{FacilityType}) \rangle, \\ \langle \boldsymbol{PARTNER-ADRESS}, (\boldsymbol{Facility}) \rangle, \langle \boldsymbol{AdressID}, (\boldsymbol{FacilityID}) \rangle, \\ \langle \boldsymbol{PARTNER}, (\boldsymbol{BusinessPartner}, \boldsymbol{Supplier}) \rangle, \langle \boldsymbol{Partner-ID}, (\boldsymbol{TiersID}, \boldsymbol{SupplierID}) \rangle, \\ \langle \boldsymbol{WarehouseID}, (\boldsymbol{FacilityID}) \rangle, \langle \boldsymbol{Warehouse}, (\boldsymbol{FACILITY}, \boldsymbol{ProductFacility}) \rangle, \\ \langle \boldsymbol{PartnerOrderType}, (\boldsymbol{SupplierDescription}) \rangle, \langle \boldsymbol{ORDER-PARTNER}, (\boldsymbol{BusinessPartner}, \boldsymbol{Supplier}) \rangle \\ \langle \boldsymbol{PRODUCT}, (\boldsymbol{Product}) \rangle, \langle \boldsymbol{ProductNo}, (\boldsymbol{Product\ No}) \rangle, \langle \boldsymbol{ProductID}, (\boldsymbol{Article\ Code}) \rangle \end{array} \right\}$$

Et

$$R_c^{2e} = \left\{ \begin{array}{c} \langle \boldsymbol{Command\ number}, (\boldsymbol{orderNo}) \rangle, \langle \boldsymbol{Command\ Date}, (\boldsymbol{CreatedOn}) \rangle, \\ \langle \boldsymbol{Command\ Line}, (\boldsymbol{OrderLineNo}) \rangle, \langle \boldsymbol{stock\ Unit}, (\boldsymbol{UOMCode}) \rangle, \langle \boldsymbol{PurchaseUnit}, (\boldsymbol{UOMCode}) \rangle, \\ \langle \boldsymbol{PurchaseOrderQuantity}, (\boldsymbol{Orderdetail}) \rangle, \langle \boldsymbol{QuantityOrdred}, (\boldsymbol{QuantityOrder}) \rangle, \langle \boldsymbol{Units}, (\boldsymbol{UOM}) \rangle, \\ \langle \boldsymbol{Unit}, (\boldsymbol{UOMCode}) \rangle, \langle \boldsymbol{Product}, (\boldsymbol{Product}) \rangle, \langle \boldsymbol{ProductNo}, (\boldsymbol{ProductNo}) \rangle, \langle \boldsymbol{ArticleCode}, (\boldsymbol{ProductID}) \rangle \\ \langle \boldsymbol{Facility}, (\boldsymbol{Facility}, \boldsymbol{Warehouse}) \rangle, \langle \boldsymbol{FacilityID}, (\boldsymbol{FacilityID}) \rangle, \langle \boldsymbol{PurchaseRequest}, (\boldsymbol{Wip\text{-}Order}) \rangle \\ \langle \boldsymbol{RequestNo}, (\boldsymbol{WipOrderNo}) \rangle, \langle \boldsymbol{RequestDate}, (\boldsymbol{CreatedOn}) \rangle \\ \langle \boldsymbol{PurchaseRequestDetail}, (\boldsymbol{Wip\text{-}Order}) \rangle, \langle \boldsymbol{PurchaseRequestQauntity}, (\boldsymbol{OrderQuantity}) \rangle, \\ \langle \boldsymbol{BusinessPartner}, (\boldsymbol{Partner}, \boldsymbol{Partner\text{-}Adress}) \rangle \\ \langle \boldsymbol{Tiers}, (\boldsymbol{PartnerId}) \rangle, \langle \boldsymbol{Interfacility}, (\boldsymbol{AdresseID}) \rangle, \langle \boldsymbol{Supplier}, (\boldsymbol{Order\text{-}Partner}) \rangle, \\ \langle \boldsymbol{SupplierID}, (\boldsymbol{PartnerID}) \rangle, \langle \boldsymbol{SupplierDescription}, (\boldsymbol{PartnerOrderType}) \rangle \end{array} \right\}$$

3.2. Evaluation du degré d'interopérabilité

Dans cette section, nous élaborons les différentes mesures de l'interopérabilité, énoncées dans le chapitre 3, pour quantifier et qualifier l'interopération potentielle et effective entre les deux systèmes d'information MES et ERP, à travers l'analyse de leurs modèles conceptuels respectifs.

3.2.1. Étude de l'interopérabilité de l'ERP Sage X3 (SI_2) vers le MES Flexnet (SI_1)

Quand il s'agit d'évaluer l'interopération de SI_2 vers SI_1, nous nous intéressons alors à l'analyse des relations sémantiques identifiées dans R_c^1 et $R_{c_{expected}}^1 = MC_{SI_1}$.

1. Mesure de l'interopérabilité potentielle maximale et son effectivité associée

La métrique de l'interopérabilité potentielle maximale est notée $\nu_{2\to1}$(%), et est définie comme suit :

$$\nu_{2\to1} = \frac{|R_c^1|}{|MC_{SI_1}|}$$

Par ailleurs, Il est aussi important de mesurer l'effectivité des relations sémantiques associée à l'interopérabilité potentielle et identifiée à l'aide de la métrique $\varepsilon_{2\to1}$ (%) définie comme suit :

$$\varepsilon_{2\to1} = \frac{|R_c^{1e}|}{|R_c^1|}$$

Les experts du domaine ont identifié les relations sémantiques. Nous pouvons alors valuer : $|R_c^1| = 27$, $|R_c^{1e}| = 25$. En revanche, le nombre de relations sémantiques attendues est $\left|MC_{SI_1}\right| = 40$. Ce qui nous permet de calculer:

$$\nu_{2\to1} = \frac{|R_c^1|}{\left|MC_{SI_1}\right|} = \frac{27}{40} = 67.5\%$$

$$\varepsilon_{2\to1} = \frac{|R_c^{1e}|}{|R_c^1|} = \frac{25}{27} = 92\%$$

La valeur de $\nu_{2\to1}$ est égale alors à $67.5\% < 100\%$, ce qui implique que l'ERP Sage X3 est ***partiellement interopérable*** avec le MES Flexnet. De plus, 92% $(= \varepsilon_{2\to1})$ des relations sémantiques appartenant à R_c^1 sont effectives.

Il en résulte que le niveau d'Interopérabilité Potentielle Maximale $IPM_{2\to1} = (\nu_{2\to1}, \varepsilon_{2\to1})$ correspond au point $IPM_{2\to1}$ $(67.5\%, 92\%)$ du graphe de la Figure 51.

En revanche, l'écart sémantique qui correspond à la perte sémantique est égale à $100\% - \nu_{2\to1} = 32.5\%$. La sémantique manquante correspond à la sémantique des concepts c_j^1 de MC_{SI_1} pour lesquels la relation $R_{c_j}^1$ n'a pas pu être identifiée. Ce qui signifie que la sémantique de ces concepts ne peut pas être fournie par l'ERP à moins de modifier l'ERP pour rajouter cette sémantique. Ces concepts sont contenus dans l'ensemble $R_{c_{expected}}^1 \setminus R_c^1$ et correspondent à : *WIP_ORDER_TYPE, WipOrderType, WIP_ORDER_STATUS, WipOrderStatus, CreatedOn, PartnerOrderNo, FUID, ProcessDescription, RevisionControlFlag, SerialTrackingCode, LotTrackingCode, PROCESS, ProcessId*. Cette sémantique manquante peut être départagée en deux catégories caractérisée suivant l'effort à déployer pour combler la sémantique manquante. En effet, la première catégorie est celle des concepts qui peuvent être facilement ajoutés dans l'ERP (qui ont une sémantique simple comme pour le concept *CreatedOn* qui contient simplement la date du jour et qui peut même être instancié automatiquement). Cette sémantique peut, par exemple, être comblée par des concepts déjà présents dans l'ERP mais qui ne sont jamais instanciés. On peut alors détourner ces concepts de l'usage prévu pour qu'ils supportent une partie au moins de la sémantique manquante. On peut même imaginer vouloir modifier la base de données qui supporte l'ERP pour rajouter la table manquante avec les bons liens. Le risque ici n'est pas nul. Il faut être capable de tracer cette solution au cas où l'entreprise migrerait vers une nouvelle version de l'ERP pour que les modifications apportées soient upgradées en même temps que le progiciel. En revanche, la seconde catégorie regroupe l'ensemble des concepts dont la sémantique est plus complexe et dont le comblement dans l'ERP nécessite des efforts plus importants. Ceci est vrai par exemple pour WIP_ORDER_STATUS et WIP_ORDER_TYPE dont on peut imaginer que les utilisateurs de l'ERP n'ont pas les connaissances nécessaires pour instancier correctement ces concepts même s'ils étaient présents dans l'ERP.

La valeur de $100\% - \varepsilon_{2\to1} = 8\%$ correspond à la mesure du **risque sémantique** pouvant potentiellement nuire à l'interopération. En effet, cette valeur représente le risque, lors de l'échange d'informations, d'avoir des relations sémantiques qui ne sont pas effectives dus au caractère non-obligatoire de certains concepts impliqués dans cette relation. En effet les concepts non-obligatoires peuvent ne pas être instanciés et par suite l'information associée peut manquer lors de l'échange d'information. Nous verrons dans la section 3.3 comment il est possible d'annuler ce risque tout en mesurant l'effet de cette annulation de risque sur la performance d'interopérabilité dans l'autre direction (de MES vers ERP).

2. Mesure de l'interopérabilité effective minimale et son effectivité associée

Les deux mesures $\nu^{e}_{1\to2}(\%)$ et $\varepsilon^{e}_{1\to2}(\%)$ permettent d'évaluer qualitativement l'interopérabilité et sont formellement définies comme suit :

$$\nu^{e}_{2\to1} = \frac{|R^{1e}_{c}|}{|MC_{SI_1}|} = \frac{|R^{1}_{c}|}{|MC_{SI_1}|} \times \frac{|R^{1e}_{c}|}{|R^{1}_{c}|} = \nu_{2\to1} \times \varepsilon_{2\to1}$$

$$\varepsilon^{e}_{2\to1} = \frac{|R^{1e}_{c}|}{|R^{1e}_{c}|} = 100\%$$

L'application numérique est telle que:

$$\nu^{e}_{2\to1} = \frac{|R^{1e}_{c}|}{|MC_{SI_1}|} = \frac{25}{40} = 62.5\%$$

et,

$$\varepsilon^{e}_{2\to1} = 100\%$$

La valeur de $\nu^{e}_{2\to1}$ est égale à $62.5\% < 100\%$, ce qui implique que l'ERP Sage X3 est partiellement interopérable avec le MES Flexnet tout en garantissant que cette interopérabilité partielle est entièrement effective.

Il en résulte que le degré d'Interopérabilité Effective Minimale correspond au point $IEM_{2\to1}$ $(62.5\%, 100\%)$ du graphe de la Figure 51.

3.2.2. Étude de l'interopérabilité du MES Flexnet (SI_1) vers l'ERP Sage X3 (SI_2)

L'étude de l'interopérabilité de SI_1 vers SI_2 requiert l'utilisation des relations sémantiques appartenant aux ensembles R_c^2 et $R_{c_{expected}}^2$.

1. Mesure de l'interopérabilité potentielle maximale et son effectivité associée

Les experts du domaine ont identifié les relations sémantiques telles que : $|R_c^2| = 30$, $|R_c^{2e}| = 25$. Par ailleurs, le nombre de relations sémantiques attendues est égale à $\left| R_{c_{expected}}^2 \right| = |MC_{SI_2}| = 37.$

Ces valeurs nous permettent de calculer les mesures du potentiel et l'effectivité de l'interopérabilité comme suit :

$$\nu_{1\to2} = \frac{|R_c^2|}{|MC_{SI_2}|} = \frac{30}{37} = 81\%$$

$$\varepsilon_{1\to2} = \frac{|R_c^{2e}|}{|R_c^2|} = \frac{25}{30} = 83\%$$

La valeur de $\nu_{1\to2}$ est égale à $81\% < 100\%$ donc le MES Flexnet est partiellement interopérable avec l'ERP Sage X3. De plus la valeur de $\varepsilon_{1\to2}$ indique que seules 83% des relations sémantiques identifiées sont effectives. Ceci implique que le niveau de l'Interopérabilité Potentielle Maximale correspond au point $IPM_{1\to2}$ $(81\%, 83\%)$ du graphe de la Figure 53.

En revanche, l'écart sémantique calculé par $100\% - \nu_{1\to2}$ est égale à 19%. Il en résulte que la sémantique manquante correspond à celle donnée par les concepts c_j^2 appartenant à C_{IS_2} tels que la relation sémantique $R_{c_j}^2$ n'a pas pu être identifiée. Par ailleurs, ces relations manquantes sont inclues dans l'ensemble $R_{c_{expected}}^2 \setminus R_c^2$. La sémantique manquante est donc représentée par les concepts : *Command Type, Total Included Taxes, Purchase Order, Product-Facility, CreationDate, PurchaseRequestLine, Country*.

Les conclusions que nous avions tirées sur la sémantique manquante dans l'étude de l'autre direction d'interopérabilité peuvent être adaptées ici.

La valeur de $100\% - \varepsilon_{1\to2} = 17\%$ correspond à la mesure du **risque sémantique** pouvant potentiellement nuire à l'interopération. Là aussi, Les conclusions que nous avions tirées dans l'étude de l'autre direction d'interopérabilité peuvent être adaptées ici.

2. Mesure de l'interopérabilité effective minimale et son effectivité associée

L'application numérique des mesures liées à l'interopérabilité effective est la suivante:

$$\nu^{e}_{1\to 2} = \frac{|R^{2e}_{c}|}{|MC_{SI_2}|} = \frac{25}{37} = 68\%$$

et,

$$\varepsilon^{e}_{1\to 2} = 100\%$$

La valeur de $\nu^{e}_{1\to 2} = 68\% < 100\%$ signifie que le MES Flexnet est partiellement interopérable avec l'ERP sage X3 tout en garantissant que cette interopérabilité partielle est complètement effective. Ainsi, le niveau de l'Interopérabilité Effective Minimale correspond au point $IEM_{1\to 2}$ $(68\%, 100\%)$ du graphe de la Figure 53.

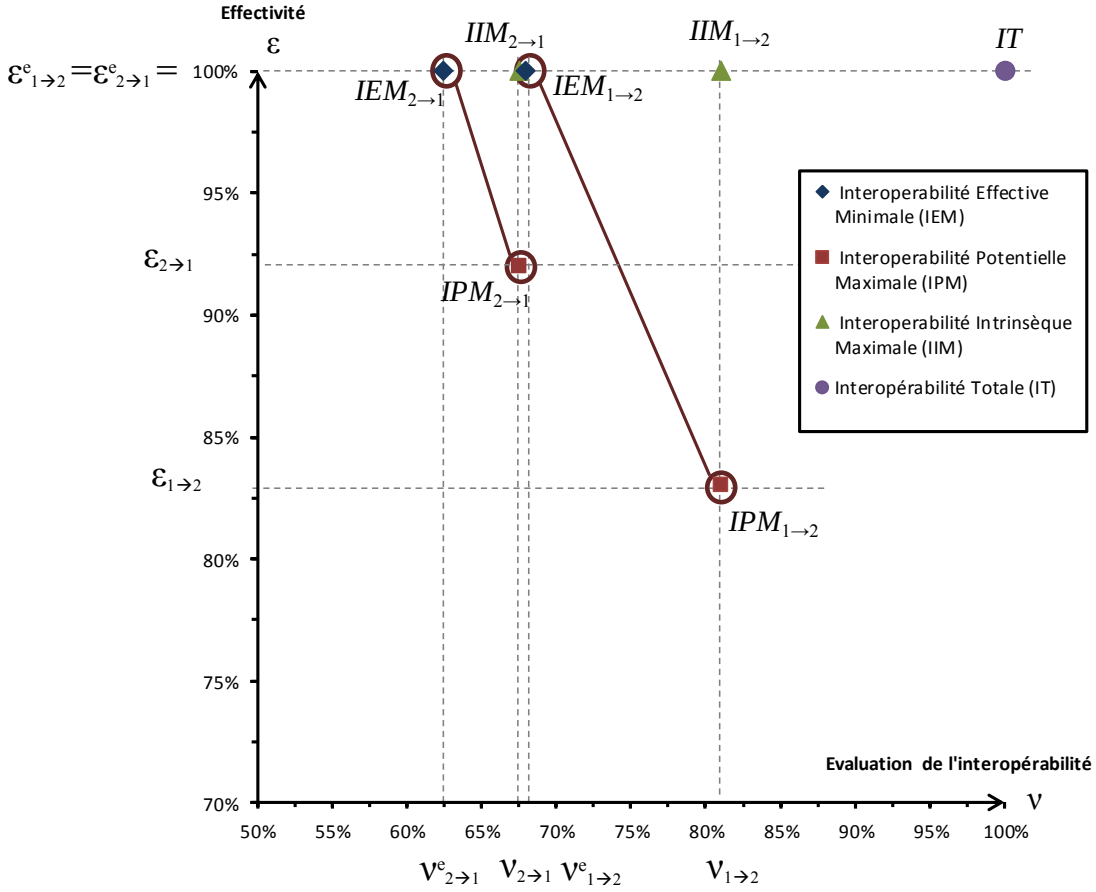


Figure 53. Cartographie des mesures d'interopérabilité sémantique pour les deux directions d'interopérabilité

Les différents degrés d'interopérabilité potentielle et effective entre les deux systèmes d'information, dans les deux directions d'interopérabilité possibles, sont représentés sur la Figure 53.

L'analyse de ces degrés d'interopérabilité nous permet d'envisager (spécifier) diverse actions d'améliorations conduisant à l'amélioration des mesures de l'interopérabilité calculées, et ceci en mettant en œuvre des stratégies de paramétrage et de personnalisation des systèmes d'information d'entreprise correspondants. Une stratégie peut être privilégiée par rapport à une autre stratégie en raison de son coût et/ou du temps de mise en œuvre.

Nous détaillons dans la section suivante, les éventuelles corrélations dues aux différentes actions d'améliorations pouvant être menées.

3.3. Stratégies d'amélioration des niveaux d'interopérabilité

Dans cette section, nous considérons principalement l'étude des améliorations pour atteindre l'Interopérabilité Intrinsèque Maximale représentée par les points $IIM_{1\to2}$ et $IIM_{2\to1}$ de la Figure 54.

Par ailleurs, ces stratégies d'amélioration peuvent être menées en transformant, dans un premier temps, les concepts non obligatoires pertinents en concepts obligatoires et, dans un deuxième temps, en ajoutant de la sémantique. Cette dernière action ne peut être entreprise que par les experts du domaine des deux systèmes d'information étudiés, et se situe hors du périmètre d'analyse de cette section.

Nous nous focalisons donc, sur la transformation de la connaissance non-obligatoire dans un système d'information puis dans l'autre. Ceci nous permet d'étudier la corrélation qui existe entre la transformation des concepts non-obligatoires en obligatoires pour une direction de l'interopérabilité et le degré d'interopérabilité induit par ces modifications pour l'autre direction.

1. L'Interopérabilité Intrinsèque Maximale IIM $(\boldsymbol{\nu_{1\to2}}, \boldsymbol{\varepsilon^{e}_{1\to2}})$

Les experts transforment les concepts non obligatoires du MES Flexnet (SI_1) participant aux relations sémantiques identifiées dans R_c^2 à savoir (*DomainManager, ResourceType, ProductText, UOMText, et UnitOfMeasure*)[40], dans le but d'atteindre l'Interopérabilité Intrinsèque Maximale $(\nu_{1\to2}, \varepsilon^{e}_{1\to2})$ avec :

[40] Par exemple la relation sémantique $\langle \boldsymbol{CorporateName}, (DomainManager)\rangle$ fait intervenir le concept non-obligatoire $DomainManager$.

$$\nu_{1\to 2} = \frac{|R_c^2|}{|MC_{SI_2}|} = \frac{30}{37} = 81\%$$

et,

$$\varepsilon_{1\to 2}^{e} = \frac{|R_c^{2e}|}{|R_c^2|} = \frac{30}{30} = 100\%^{41}$$

Cette transformation a un effet sur l'interopérabilité de l'ERP Sage X3 (SI_2) vers le MES Flexnet (SI_1). En effet, le fait de modifier les paramètres du MES de telle sorte que des concepts non-obligatoires deviennent obligatoires impacte $R^1_{c_{expected}}$. Pour que l'ERP interopère complètement avec le MES, il faut qu'il existe des relations sémantiques pour les concepts qui ont été rendus obligatoires. Il faut donc que l'expert du domaine identifie si ces relations existent ou non.

Nous mettons à jour ci-après les ensembles R_c^1 et R_c^{1e} dans lesquels les concepts obligatoires ajoutés sont soulignés. Nous notons ces ensembles respectivement R_c^{1*} et R_c^{1e*}.

$$R_c^{1*} = \left\{ \begin{array}{c} \langle \boldsymbol{WIP_ORDER}, (\boldsymbol{PurchaseRequestDetail}, \boldsymbol{PurchaseRequest})\rangle, \langle \boldsymbol{WipOrderNo}, (\boldsymbol{RequestNo})\rangle, \\ \langle \boldsymbol{CreatedOn}, (\boldsymbol{RequestDate})\rangle, \langle \boldsymbol{OrderQuantity}, (\boldsymbol{PurchaseOrder})\rangle, \\ \langle \boldsymbol{ORDER-DETAIL}, (\boldsymbol{PurchaseRequestQuantity})\rangle, \langle \boldsymbol{OrderLineNo}, (\boldsymbol{CommandLineNo})\rangle, \\ \langle \boldsymbol{ORDER-HEADER}, (\boldsymbol{PurchaseOrder})\rangle, \langle \boldsymbol{OrderDate}, (\boldsymbol{CommandDate})\rangle, \\ \langle \boldsymbol{OrderNo}, (\boldsymbol{CommandNumber})\rangle, \langle \boldsymbol{UOM}, (\boldsymbol{Units})\rangle, \langle \boldsymbol{UOMcode}, (\boldsymbol{Unit})\rangle, \\ \langle \boldsymbol{FACILITY}, (\boldsymbol{Facility})\rangle, \langle \boldsymbol{FacilityID}, (\boldsymbol{FacilityID})\rangle, \langle \boldsymbol{Division}, (\boldsymbol{FacilityType})\rangle, \\ \langle \boldsymbol{PARTNER-ADRESS}, (\boldsymbol{Facility})\rangle, \langle \boldsymbol{AdressID}, (\boldsymbol{FacilityID})\rangle, \\ \langle \boldsymbol{PARTNER}, (\boldsymbol{BusinessPartner}, \boldsymbol{Supplier})\rangle, \langle \boldsymbol{Partner-ID}, (\boldsymbol{TiersID}, \boldsymbol{SupplierID})\rangle, \\ \langle \boldsymbol{WarehouseID}, (\boldsymbol{FacilityID})\rangle, \langle \boldsymbol{Warehouse}, (\boldsymbol{FACILITY}, \boldsymbol{ProductFacility})\rangle, \\ \langle \boldsymbol{PartnerOrderType}, (\boldsymbol{SupplierDescription})\rangle, \langle \boldsymbol{ORDER-PARTNER}, (\boldsymbol{BusinessPartner}, \boldsymbol{Supplier})\rangle \\ \langle \boldsymbol{ORDER-STATUS}, (PurchaseOrderStatus)\rangle, \langle \boldsymbol{OrderStatus}, (PurchaseOrderStatus)\rangle \\ \langle \boldsymbol{PRODUCT}, (\boldsymbol{Product})\rangle, \langle \boldsymbol{ProductNo}, (\boldsymbol{Product\ No})\rangle, \langle \boldsymbol{ProductID}, (\boldsymbol{Article\ Code})\rangle \\ \langle \underline{\textbf{RessourceType}}, (\text{StaticFamily})\rangle, \langle \underline{\textbf{UOMText}}, (\text{UnitDescription})\rangle, \\ \langle \underline{\textbf{UnitOfMeasure}}, (\text{Symbol})\rangle, \langle \underline{\textbf{ProductText}}, (\textbf{ProductDescription})\rangle \end{array} \right\}$$

[41] Puisque tous les concepts non obligatoires intervenant dans R_c^2 deviennent obligatoires nous avons $R_c^{2e} = R_c^2$.

Et,

$$R_c^{1e*} = \left\{ \begin{array}{c} \langle \boldsymbol{WIP_ORDER}, (\boldsymbol{PurchaseRequestDetail}, \boldsymbol{PurchaseRequest}) \rangle, \langle \boldsymbol{WipOrderNo}, (\boldsymbol{RequestNo}) \rangle, \\ \langle \boldsymbol{CreatedOn}, (\boldsymbol{RequestDate}) \rangle, \langle \boldsymbol{OrderQuantity}, (\boldsymbol{PurchaseOrder}) \rangle, \\ \langle \boldsymbol{ORDER-DETAIL}, (\boldsymbol{PurchaseRequestQuantity}) \rangle, \langle \boldsymbol{OrderLineNo}, (\boldsymbol{CommandLineNo}) \rangle, \\ \langle \boldsymbol{ORDER-HEADER}, (\boldsymbol{PurchaseOrder}) \rangle, \langle \boldsymbol{OrderDate}, (\boldsymbol{CommandDate}) \rangle, \\ \langle \boldsymbol{OrderNo}, (\boldsymbol{CommandNumber}) \rangle, \langle \boldsymbol{UOM}, (\boldsymbol{Units}) \rangle, \langle \boldsymbol{UOMcode}, (\boldsymbol{Unit}) \rangle, \\ \langle \boldsymbol{FACILITY}, (\boldsymbol{Facility}) \rangle, \langle \boldsymbol{FacilityID}, (\boldsymbol{FacilityID}) \rangle, \langle \boldsymbol{Division}, (\boldsymbol{FacilityType}) \rangle, \\ \langle \boldsymbol{PARTNER-ADRESS}, (\boldsymbol{Facility}) \rangle, \langle \boldsymbol{AdressID}, (\boldsymbol{FacilityID}) \rangle, \\ \langle \boldsymbol{PARTNER}, (\boldsymbol{BusinessPartner}, \boldsymbol{Supplier}) \rangle, \langle \boldsymbol{Partner-ID}, (\boldsymbol{TiersID}, \boldsymbol{SupplierID}) \rangle, \\ \langle \boldsymbol{WarehouseID}, (\boldsymbol{FacilityID}) \rangle, \langle \boldsymbol{Warehouse}, (\boldsymbol{FACILITY}, \boldsymbol{ProductFacility}) \rangle, \\ \langle \boldsymbol{PartnerOrderType}, (\boldsymbol{SupplierDescription}) \rangle, \langle \boldsymbol{ORDER-PARTNER}, (\boldsymbol{BusinessPartner}, \boldsymbol{Supplier}) \rangle \\ \langle \boldsymbol{PRODUCT}, (\boldsymbol{Product}) \rangle, \langle \boldsymbol{ProductNo}, (\boldsymbol{Product\ No}) \rangle, \langle \boldsymbol{ProductID}, (\boldsymbol{Article\ Code}) \rangle \\ \langle \underline{\mathbf{ProductText}}, (\mathbf{ProductDescription}) \rangle \end{array} \right\}$$

Nous élaborons les valeurs suivantes : $|R_c^{1*}| = 31,\ |R_c^{1e*}| = 26$ et $\left| R_{c_{expected}}^{1*} \right| = 45$

- Pour l'évaluation de l'interopérabilité potentielle, nous avons :

$$\nu_{2\to1}^{*} = \frac{|R_c^{1*}|}{\left|R_{c_{expected}}^{1*}\right|} = \frac{31}{45} = 69\%$$

$$\varepsilon_{2\to1}^{*} = \frac{|R_c^{1e*}|}{|R_c^{1*}|} = \frac{26}{31} = 84\%$$

- Pour l'évaluation de l'interopérabilité effective, nous avons :

$$\nu_{2\to1}^{e*} = \frac{|R_c^{1e*}|}{\left|R_{c_{expected}}^{1*}\right|} = \frac{26}{45} = 58\%$$

Les nouvelles mesures établies montrent une légère diminution de la mesure de l'interopérabilité effective malgré une augmentation de l'interopérabilité potentielle (voir Figure 54).

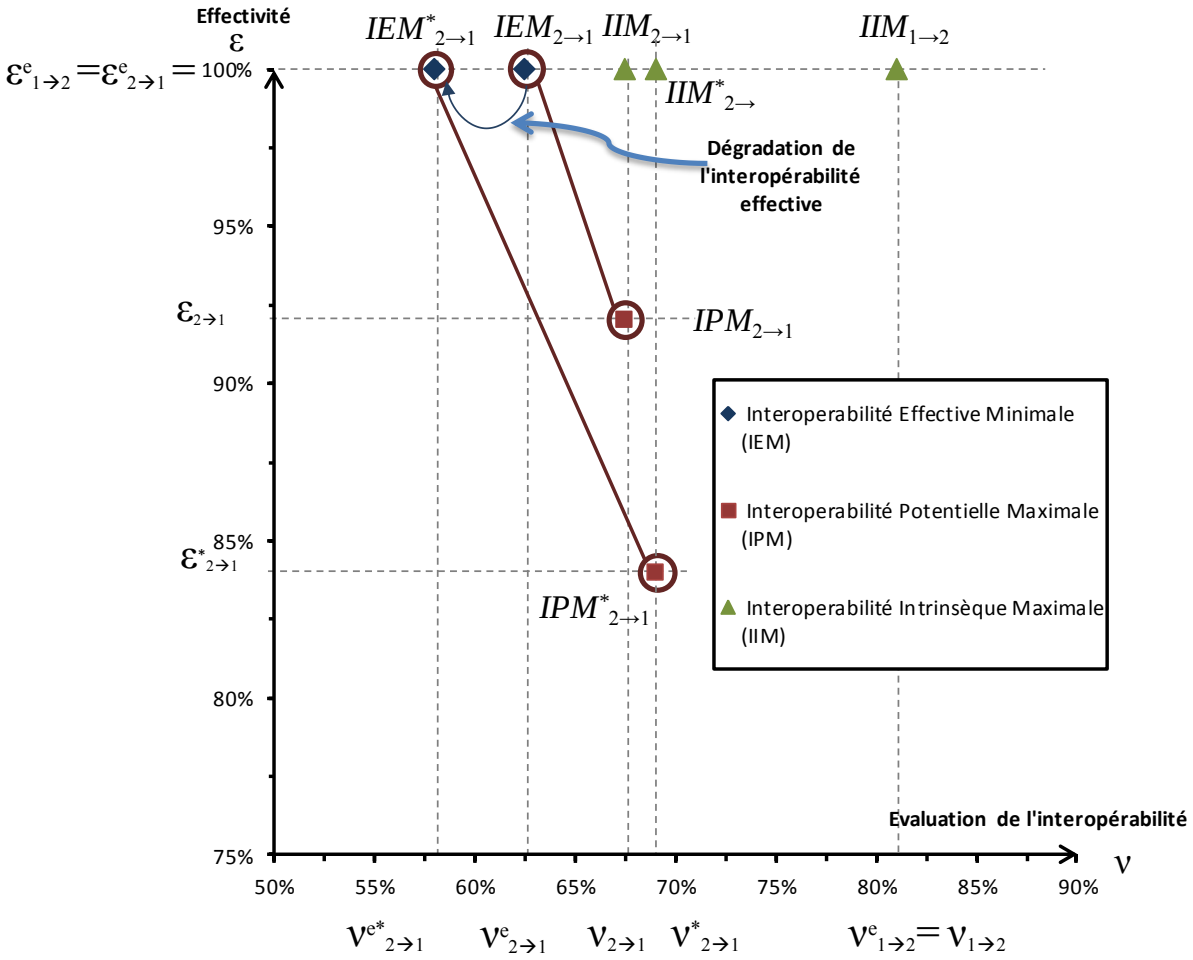


Figure 54. Dégradation de la mesure de l'interopérabilité effective $\nu^{e}_{2\to1}$ après amélioration de la mesure $\nu^{e}_{1\to2}$

2. L'Interopérabilité Intrinsèque Maximale IIM$(\nu_{2\to1}, \varepsilon^{e}_{2\to1})$

Les experts transforment les concepts non obligatoires de l'ERP Sage X3 (SI_2) participant aux relations sémantiques identifiées dans R^1_c à savoir (*PurchaseOrderStatus*)[42], dans le but d'atteindre l'Interopérabilité Intrinsèque Maximale $(\nu_{2\to1}, \varepsilon^{e}_{2\to1})$ avec :

$$\nu_{2\to1} = \frac{|R^1_c|}{|MC_{SI_1}|} = \frac{27}{40} = 67.5\%$$

[42] $PurchaseOrderStatus$ apparait dans les relations sémantiques $\langle \boldsymbol{OrderStatus}, (PurchaseOrderStatus)\rangle$ et $\langle \boldsymbol{ORDER_STATUS}, (PurchaseOrderStatus)\rangle$.

Et,

$$\varepsilon_{2\to1}^{e} = 100\%$$

Pour des raisons symétriques à l'analyse dans l'autre direction, cette transformation a évidemment un effet sur l'interopérabilité du MES Flexnet (SI_1) vers l'ERP Sage X3 (SI_2).

Nous mettons à jour ci-après les ensembles R_c^2 et R_c^{2e} dans lesquels les concepts obligatoires ajoutés sont soulignés. Nous notons ces ensembles respectivement R_c^{2*} et R_c^{2e*}.

$$R_c^{2*} = \left\{ \begin{array}{c} \langle \textbf{Command number}, (\textbf{orderNo})\rangle, \langle \textbf{Command Date}, (\textbf{CreatedOn})\rangle, \\ \langle \textbf{Command Line}, (\textbf{OrderLineNo})\rangle, \langle \textbf{stock Unit}, (\textbf{UOMCode})\rangle, \langle \textbf{Purchase Unit}, (\textbf{UOMCode})\rangle, \\ \langle \textbf{PurchaseOrderQuantity}\ , (\textbf{Orderdetail})\rangle, \langle \textbf{QuantityOrder}, (\textbf{QuantityOrder})\rangle, \langle \textbf{Unit}\ , (\textbf{UOM})\rangle, \\ \langle \textbf{Unit}, (\textbf{UOMCode})\rangle, \langle \textbf{UnitDescription}, (\text{UOMtext})\rangle, \langle \textbf{Symbols}, (\text{UnitOFMeasure})\rangle, \\ \langle \textbf{Product}\ , (\textbf{Product})\rangle, \langle \textbf{ProductNo}, (\textbf{ProductNo})\rangle, \langle \textbf{ArticleCode}, (\textbf{ProductID})\rangle, \\ \langle \textbf{ProductDescription}\ , (\text{ProductText})\rangle, \langle \textbf{Facility}, (\textbf{Facility}, \textbf{Warehouse})\rangle, \langle \textbf{FacilityID}, (\textbf{FacilityID})\rangle, \\ \langle \textbf{PurchaseRequest}\ , (\textbf{Wip-Order})\rangle, \langle \textbf{RequestNo}, (\textbf{WipOrderNo})\rangle, \\ \langle \textbf{RequestDate}, (\textbf{CreatedOn})\rangle, \langle \textbf{Customer}, (\text{RessourceType})\rangle \\ \langle \textbf{PurchaseRequestDetail}\ , (\textbf{Wip-Order})\rangle, \langle \textbf{PurchaseRequestQauntity}, (\textbf{OrderQuantity})\rangle, \\ \langle \textbf{BusinessPartner}, (\textbf{Partner}, \textbf{Partner-Adress})\rangle, \langle \textbf{TiersID}, (\textbf{PartnerId})\rangle, \langle \textbf{Interfacility}, (\textbf{AdresseID})\rangle \\ \langle \textbf{Supplier}\ , (\textbf{Order-Partner})\rangle, \langle \textbf{SupplierID}\ , (\textbf{PartnerID})\rangle, \\ \langle \textbf{SupplierDescription}, (\textbf{PartnerOrderType})\rangle, \langle \textbf{CorporationName}, (\text{DomainManager})\rangle, \\ \langle \underline{\textbf{PurchaseOrderStatus}}, (\textbf{OrderStatus})\rangle \end{array} \right\}$$

Et,

$$R_c^{2e*} = \left\{ \begin{array}{c} \langle \textbf{Command number}, (\textbf{orderNo})\rangle, \langle \textbf{Command Date}, (\textbf{CreatedOn})\rangle, \\ \langle \textbf{Command Line}, (\textbf{OrderLineNo})\rangle, \langle \textbf{stock Unit}, (\textbf{UOMCode})\rangle, \langle \textbf{Purchase Unit}, (\textbf{UOMCode})\rangle, \\ \langle \textbf{PurchaseOrderQuantity}\ , (\textbf{Orderdetail})\rangle, \langle \textbf{QuantityOrder}, (\textbf{QuantityOrder})\rangle, \langle \textbf{Unit}\ , (\textbf{UOM})\rangle, \\ \langle \textbf{Unit}, (\textbf{UOMCode})\rangle, \langle \textbf{Product}\ , (\textbf{Product})\rangle, \langle \textbf{ProductNo}, (\textbf{ProductNo})\rangle, \langle \textbf{ArticleCode}, (\textbf{ProductID})\rangle \\ \langle \textbf{Facility}, (\textbf{Facility}, \textbf{Warehouse})\rangle, \langle \textbf{FacilityID}, (\textbf{FacilityID})\rangle, \langle \textbf{PurchaseRequest}\ , (\textbf{Wip-Order})\rangle \\ \langle \textbf{RequestNo}, (\textbf{WipOrderNo})\rangle, \langle \textbf{RequestDate}, (\textbf{CreatedOn})\rangle \\ \langle \textbf{PurchaseRequestDetail}\ , (\textbf{Wip-Order})\rangle, \langle \textbf{PurchaseRequestQauntity}, (\textbf{OrderQuantity})\rangle, \\ \langle \textbf{BusinessPartner}, (\textbf{Partner}, \textbf{Partner-Adress})\rangle, \langle \textbf{Tiers}, (\textbf{PartnerId})\rangle, \\ \langle \textbf{Interfacility}, (\textbf{AdresseID})\rangle, \langle \textbf{Supplier}\ , (\textbf{Order-Partner})\rangle, \langle \textbf{SupplierID}\ , (\textbf{PartnerID})\rangle, \\ \langle \textbf{SupplierDescription}, (\textbf{PartnerOrderType})\rangle, \langle \underline{\textbf{PurchaseOrderStatus}}, (\textbf{OrderStatus})\rangle \end{array} \right\}$$

Nous définissons $|R_c^{2*}| = 31$, $|R_c^{2e*}| = 26$ et $\left| R_{c_{expected}}^{2*} \right| = 38$

- Pour l'évaluation de l'interopérabilité potentielle, nous avons :

$$\nu_{1\to2}^{*} = \frac{|R_c^{2*}|}{\left|R_{c_{expected}}^{2*}\right|} = \frac{31}{38} = 81.5\%$$

$$\varepsilon_{1\to2}^{*} = \frac{|R_c^{2e}|}{|R_c^{2}|} = \frac{26}{31} = 84\%$$

- Pour l'évaluation de l'interopérabilité effective, nous avons :

$$\nu_{1\to2}^{e*} = \frac{|R_c^{2e}|}{|MC_{SI_2}|} = \frac{26}{38} = 68.4\%$$

La Figure 55 illustre les différentes variations des mesures. Nous pouvons voir que la mesure d'interopérabilité effective minimale est sensiblement améliorée malgré une légère baisse d'interopérabilité potentielle (celle-ci est compensée par une légère hausse de l'effectivité associée).

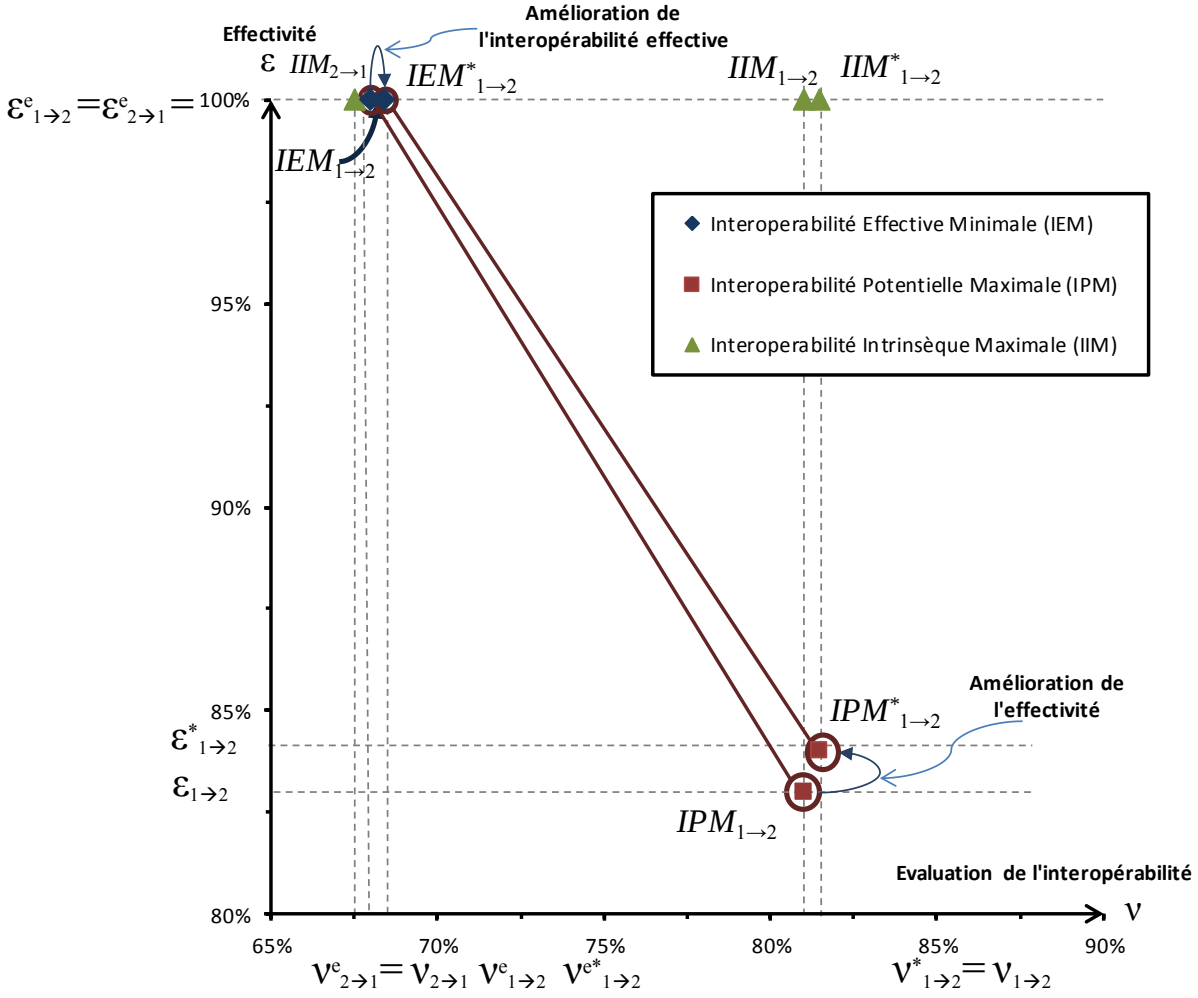


Figure 55. Effets de l'évaluation de l'interopérabilité MES (SI_1) vers l'ERP (SI_2)

4. Formalisation et évaluation de l'interopérabilité des sous-systèmes d'information

Dans cette section, nous allons étudier la formalisation, puis l'évaluation de l'interopérabilité entre les sous-systèmes ss_i^1 du MES Flexnet (SI_1) et les sous-systèmes ss_i^2 de l'ERP sage X3 (SI_2).

Rappelons qu'évaluer l'interopérabilité entre les sous-systèmes d'information consiste à étudier l'interopérabilité selon les directions suivantes :

1. De SI_1 vers ss_i^2 : nous avons besoin de formaliser R_{SB}^2.
2. De SI_2 vers ss_i^1 : nous avons besoin de formaliser R_{SB}^1.

4.1. Approche de formalisation des relations d'interopérabilité sémantiques R_{SB}

Les relations sémantiques entres les blocs sémantiques peuvent être directement déduites des relations sémantiques R_c entre les concepts.

Nous cherchons $R_{SB_1^1}^1$ telle que SB_1^1 est le bloc sémantique $SB_1^1(\text{WAREHOUSE})$ formés par les concepts {WAREHOUSE, WarehouseID, FACILITY, FacilityID, Division}.
Nous cherchons l'ensemble des relations sémantiques $R_{c_k}^1 \in R_c^1$ telles que $c_k^1 \in SB_1^1(\text{WAREHOUSE})$, nous trouvons :

$$(\langle Warehouse, (FACILITY, ProductFacility)\rangle,$$
$$\langle WarehouseID, (FacilityID)\rangle, \langle FACILITY, (Facility)\rangle \text{ et}$$
$$\langle FacilityID, (FacilityID)\rangle, \langle Division\ , (FacilityType)\rangle)$$

Par la suite, nous cherchons l'ensemble des blocs sémantiques qui contiennent les concepts $(FACILITY, ProductFacility, FacilityID, FacilityType)$, ce qui nous ramène aux blocs suivants $\begin{pmatrix} SB_1^2(\text{Purchase order}), SB_2^2(\text{Purchase order quantity}) \\ , SB_3^2(\text{PurchaseRequestDetail}), SB_4^2(\text{PurchaseRequest}), \\ SB_5^2(\text{PurchaseorderStatus}), SB_8^2(\text{Facility}), \\ SB_{10}^2(\text{Product}), SB_{11}^2(\text{ProductFacility}) \end{pmatrix}$.

Nous pouvons ainsi en déduire $R_{SB_1^1}^1$ tel que :

$$R_{SB_1^1}^1 = \langle SB_1^1(\text{WAREHOUSE}), \begin{pmatrix} SB_1^2(\text{Purchase order}), SB_2^2(\text{Purchase order quantity}) \\ , SB_3^2(\text{PurchaseRequestDetail}), SB_4^2(\text{PurchaseRequest}), \\ SB_5^2(\text{PurchaseorderStatus}), SB_8^2(\text{Facility}), \\ SB_{10}^2(\text{Product}), SB_{11}^2(\text{ProductFacility}) \end{pmatrix}\rangle$$

Nous procédons à la même démarche pour trouver l'ensemble R^1_{SB} qui est tel que nous avons :

$$R^1_{SB^1_1} = \langle SB^1_1(\text{WAREHOUSE}), \begin{pmatrix} SB^2_1(\text{Purchase order}), SB^2_2(\text{Purchase order quantity}) \\ , SB^2_3(\text{PurchaseRequestDetail}), SB^2_4(\text{PurchaseRequest}), \\ SB^2_5(\text{PurchaseorderStatus}), SB^2_8(\text{Facility}), \\ SB^2_{10}(\text{Product}), SB^2_{11}(\text{ProductFacility}) \end{pmatrix} \rangle,$$

$$R^1_{SB^1_2} = \langle SB^1_2(\text{ORDER_PARTNER}), \begin{pmatrix} SB^2_1(\text{Purchase order}), SB^2_2(\text{Purchase order quantity}) \\ , SB^2_3(\text{PurchaseRequestDetail}), SB^2_4(\text{PurchaseRequest}), \\ SB^2_5(\text{PurchaseorderStatus}), SB^2_6(\text{Supplier}), \\ SB^2_7(\text{BusinessPartner}), SB^2_{10}(\text{Product}), \\ SB^2_{11}(\text{ProductFacility}) \end{pmatrix} \rangle,$$

$$R^1_{SB^1_3} = \langle SB^1_3(\text{PARTNER_ADDRESS}), \begin{pmatrix} SB^2_1(\text{Purchase order}), SB^2_2(\text{Purchase order quantity}) \\ , SB^2_3(\text{PurchaseRequestDetail}), SB^2_4(\text{PurchaseRequest}), \\ SB^2_5(\text{PurchaseorderStatus}), SB^2_6(\text{Supplier}), \\ SB^2_7(\text{BusinessPartner}), SB^2_8(\text{Facility}) \\ SB^2_{10}(\text{Product}), SB^2_{11}(\text{ProductFacility}) \end{pmatrix} \rangle,$$

$$R^1_{SB^1_4} = \langle SB^1_4(\text{PARTNER}), \begin{pmatrix} SB^2_1(\text{Purchase order}), SB^2_2(\text{Purchase order quantity}) \\ , SB^2_3(\text{PurchaseRequestDetail}), SB^2_4(\text{PurchaseRequest}), \\ SB^2_5(\text{PurchaseorderStatus}), SB^2_6(\text{Supplier}), \\ SB^2_7(\text{BusinessPartner}), SB^2_{10}(\text{Product}), SB^2_{11}(\text{ProductFacility}) \end{pmatrix} \rangle,$$

$$R^1_{SB^1_5} = \langle SB^1_5(\text{WIP_ORDER}), \begin{pmatrix} SB^2_1(\text{Purchase order}), SB^2_2(\text{Purchase order quantity}), \\ SB^2_3(\text{PurchaseRequestDetail}), SB^2_4(\text{PurchaseRequest}), \\ SB^2_5(\text{PurchaseorderStatus}), SB^2_6(\text{Supplier}), \\ SB^2_7(\text{BusinessPartner}), SB^2_8(\text{Facility}), SB^2_9(\text{Units}), \\ SB^2_{10}(\text{Product}), SB^2_{11}(\text{ProductFacility}) \end{pmatrix} \rangle,$$

$$R^1_{SB^1_6} = \langle SB^1_6(\text{ORDER_DETAIL}), \begin{pmatrix} SB^2_1(\text{Purchase order}), SB^2_2(\text{Purchase order quantity}), \\ SB^2_3(\text{PurchaseRequestDetail}), SB^2_4(\text{PurchaseRequest}), \\ SB^2_5(\text{PurchaseorderStatus}), SB^2_6(\text{Supplier}), \\ SB^2_7(\text{BusinessPartner}), SB^2_8(\text{Facility}), SB^2_9(\text{Units}), \\ SB^2_{10}(\text{Product}), SB^2_{11}(\text{ProductFacility}) \end{pmatrix} \rangle,$$

$$R^1_{SB^1_7} = \langle SB^1_7(\text{ORDER_HEADER}), \begin{pmatrix} SB^2_1(\text{Purchase order}), SB^2_2(\text{Purchase order quantity}), \\ SB^2_3(\text{PurchaseRequestDetail}), SB^2_4(\text{PurchaseRequest}), \\ SB^2_5(\text{PurchaseorderStatus}), SB^2_6(\text{Supplier}), \\ SB^2_7(\text{BusinessPartner}), SB^2_8(\text{Facility}), SB^2_9(\text{Units}), \\ SB^2_{10}(\text{Product}), SB^2_{11}(\text{ProductFacility}) \end{pmatrix} \rangle,$$

$$R^1_{SB^1_8} =$$

$$\langle SB^1_8(\text{WIP_ORDER_TYPE}), \begin{pmatrix} SB^2_1(\text{Purchase order}), SB^2_2(\text{Purchase order quantity}), \\ SB^2_3(\text{PurchaseRequestDetail}), SB^2_4(\text{PurchaseRequest}), \\ SB^2_5(\text{PurchaseorderStatus}), SB^2_6(\text{Supplier}), \\ SB^2_7(\text{BusinessPartner}), SB^2_8(\text{Facility}), SB^2_9(\text{Units}), \\ SB^2_{10}(\text{Product}), SB^2_{11}(\text{ProductFacility}) \end{pmatrix} \rangle,$$

$\nexists R^1_{SB^1_9}$,

$$R^1_{SB^1_{10}} = \langle SB^1_{10}(\text{PRODUCT}), \begin{pmatrix} SB^2_1(\text{Purchase order}), SB^2_2(\text{Purchase order quantity}), \\ SB^2_3(\text{PurchaseRequestDetail}), SB^2_4(\text{PurchaseRequest}), \\ SB^2_5(\text{PurchaseorderStatus}), SB^2_8(\text{Facility}), SB^2_9(\text{Units}), \\ SB^2_{10}(\text{Product}), SB^2_{11}(\text{ProductFacility}) \end{pmatrix} \rangle,$$

$$R^1_{SB^1_{11}} = \langle SB^1_{11}(\text{PRODUCT}), \begin{pmatrix} SB^2_1(\text{Purchase order}), SB^2_2(\text{Purchase order quantity}), \\ SB^2_3(\text{PurchaseRequestDetail}), SB^2_4(\text{PurchaseRequest}), \\ SB^2_5(\text{PurchaseorderStatus}), SB^2_9(\text{Units}), \\ SB^2_{10}(\text{Product}), SB^2_{11}(\text{ProductFacility}) \end{pmatrix} \rangle,$$

$\nexists R^1_{SB^1_{12}}$,

$$R^1_{SB^1_{13}} = \langle SB^1_{13}(\text{FACILITY}), \begin{pmatrix} SB^2_1(\text{Purchase order}), SB^2_2(\text{Purchase order quantity}), \\ SB^2_3(\text{PurchaseRequestDetail}), SB^2_4(\text{PurchaseRequest}), \\ SB^2_5(\text{PurchaseorderStatus}), SB^2_8(\text{Facility}), \\ SB^2_{10}(\text{Product}), SB^2_{11}(\text{ProductFacility}) \end{pmatrix} \rangle,$$

$$R^1_{SB^1_{14}} =$$

$$\langle SB^1_{14}(\text{ORDER_STATUS}), \begin{pmatrix} SB^2_1(\text{Purchase order}), SB^2_2(\text{Purchase order quantity}), \\ SB^2_3(\text{PurchaseRequestDetail}), SB^2_4(\text{PurchaseRequest}), \\ SB^2_5(\text{PurchaseorderStatus}) \end{pmatrix} \rangle,$$

En revanche, l'ensemble R^2_{SB} est tel que nous avons :

$$R^2_{SB^2_1} = \langle SB^2_1(\text{Purchase order}), \begin{pmatrix} SB^1_1(\text{WAREHOUSE}), SB^1_2(\text{ORDER_PARTNER}), \\ SB^1_3(\text{PARTNER} - \text{ADDRESS}), SB^1_4(\text{PARTNER}), \\ SB^1_5(\text{WIP} - \text{ORDER}), SB^1_6(\text{ORDER} - \text{DETAIL}) \\ SB^1_7(\text{ORDER_HEADER}), SB^1_8(\text{WIP} - \text{ORDER} - \text{TYPE}) \\ SB^1_{10}(\text{PRODUCT}), SB^1_{11}(\text{UOM}), SB^1_{13}(\text{FACILITY}), \end{pmatrix} \rangle,$$

$$R^2_{SB^2_2} = \langle SB^2_2(\text{Purchase order quantity}), \begin{pmatrix} SB^1_1(\text{WAREHOUSE}), SB^1_2(\text{ORDER_PARTNER}), \\ SB^1_3(\text{PARTNER} - \text{ADDRESS}), SB^1_4(\text{PARTNER}), \\ SB^1_5(\text{WIP} - \text{ORDER}), SB^1_6(\text{ORDER} - \text{DETAIL}) \\ SB^1_7(\text{ORDER_HEADER}), SB^1_8(\text{WIP} - \text{ORDER} - \text{TYPE}) \\ SB^1_{10}(\text{PRODUCT}), SB^1_{11}(\text{UOM}), SB^1_{13}(\text{FACILITY}), \end{pmatrix} \rangle,$$

$$R^2_{SB^2_3} = \langle SB^2_3(\text{PurchaseRequestDetail}), \begin{pmatrix} SB^1_1(\text{WAREHOUSE}), SB^1_2(\text{ORDER_PARTNER}), \\ SB^1_3(\text{PARTNER} - \text{ADDRESS}), SB^1_4(\text{PARTNER}), \\ SB^1_5(\text{WIP} - \text{ORDER}), SB^1_6(\text{ORDER} - \text{DETAIL}) \\ SB^1_7(\text{ORDER_HEADER}), SB^1_8(\text{WIP} - \text{ORDER} - \text{TYPE}) \\ SB^1_{10}(\text{PRODUCT}), SB^1_{11}(\text{UOM}), SB^1_{13}(\text{FACILITY}), \end{pmatrix} \rangle,$$

$$R^2_{SB^2_4} = \langle SB^2_4(\text{PurchaseRequest}), \begin{pmatrix} SB^1_1(\text{WAREHOUSE}), SB^1_2(\text{ORDER_PARTNER}), \\ SB^1_3(\text{PARTNER} - \text{ADDRESS}), SB^1_4(\text{PARTNER}), \\ SB^1_5(\text{WIP} - \text{ORDER}), SB^1_6(\text{ORDER} - \text{DETAIL}) \\ SB^1_7(\text{ORDER_HEADER}), SB^1_8(\text{WIP} - \text{ORDER} - \text{TYPE}) \\ SB^1_{10}(\text{PRODUCT}), SB^1_{11}(\text{UOM}), SB^1_{13}(\text{FACILITY}), \end{pmatrix} \rangle,$$

$$R^2_{SB^2_5} = \langle SB^2_5(\text{PurchaseorderStatus}), \begin{pmatrix} SB^1_1(\text{WAREHOUSE}), SB^1_2(\text{ORDER} - \text{PARTNER}), \\ SB^1_3(\text{PARTNER} - \text{ADDRESS}), SB^1_4(\text{PARTNER}), \\ SB^1_5(\text{WIP} - \text{ORDER}), SB^1_6(\text{ORDER} - \text{DETAIL}) \\ SB^1_7(\text{ORDER} - \text{HEADER}), SB^1_8(\text{WIP} - \text{ORDER} - \text{TYPE}) \\ SB^1_{10}(\text{PRODUCT}), SB^1_{11}(\text{UOM}), SB^1_{13}(\text{FACILITY}), \end{pmatrix} \rangle,$$

$$R^2_{SB^2_6} = \langle SB^2_6(\text{Supplier}), \begin{pmatrix} SB^1_2(\text{ORDER} - \text{PARTNER}), SB^1_3(\text{PARTNER} - \text{ADDRESS}) \\ SB^1_4(\text{PARTNER}) \end{pmatrix} \rangle,$$

$$R^2_{SB^2_7} = \langle SB^2_7(\text{BusinessPartner}), \begin{pmatrix} SB^1_2(\text{ORDER} - \text{PARTNER}), SB^1_3(\text{PARTNER} - \text{ADDRESS}) \\ SB^1_4(\text{PARTNER}) \end{pmatrix} \rangle,$$

$$R^2_{SB^2_8} = \langle SB^2_8(\text{Facility}), \begin{pmatrix} SB^1_1(\text{WAREHOUSE}), SB^1_5(\text{WIP} - \text{ORDER}), SB^1_6(\text{ORDER} - \text{DETAIL}), \\ SB^1_7(\text{ORDER} - \text{HEADER}), SB^1_8(\text{WIP} - \text{ORDER} - \text{TYPE}), \\ SB^1_{10}(\text{PRODUCT}), SB^1_{13}(\text{FACILITY}) \end{pmatrix} \rangle,$$

$$R^2_{SB^2_9} = \langle SB^2_9(\text{Units}), \begin{pmatrix} SB^1_5(\text{WIP} - \text{ORDER}), SB^1_6(\text{ORDER} - \text{DETAIL}), \\ SB^1_7(\text{ORDER} - \text{HEADER}), SB^1_8(\text{WIP} - \text{ORDER} - \text{TYPE}), \\ SB^1_{10}(\text{PRODUCT}), SB^1_{11}(\text{UOM}) \end{pmatrix} \rangle,$$

$$R^2_{SB^2_{10}} = \langle SB^2_{10}(\text{Product}), \begin{pmatrix} SB^1_1(\text{WAREHOUSE}), SB^1_2(\text{ORDER} - \text{PARTNER}), \\ SB^1_3(\text{PARTNER} - \text{ADDRESS}), SB^1_4(\text{PARTNER}), SB^1_5(\text{WIP} - \text{ORDER}), \\ SB^1_6(\text{ORDER} - \text{DETAIL}), SB^1_7(\text{ORDER} - \text{HEADER}), \\ SB^1_8(\text{WIP} - \text{ORDER} - \text{TYPE}), SB^1_{10}(\text{PRODUCT}), \\ SB^1_{11}(\text{UOM}), SB^1_{13}(\text{FACILITY}) \end{pmatrix} \rangle,$$

$$R^2_{SB^2_{11}} = \langle SB^2_{11}(\text{ProductFacility}), \begin{pmatrix} SB^1_1(\text{WAREHOUSE}), SB^1_2(\text{ORDER} - \text{PARTNER}), \\ SB^1_3(\text{PARTNER} - \text{ADDRESS}), SB^1_4(\text{PARTNER}), \\ SB^1_5(\text{WIP} - \text{ORDER}), SB^1_6(\text{ORDER} - \text{DETAIL}) \\ SB^1_7(\text{ORDER} - \text{HEADER}), SB^1_8(\text{WIP} - \text{ORDER} - \text{TYPE}) \\ SB^1_{10}(\text{PRODUCT}), SB^1_{11}(\text{UOM}), SB^1_{13}(\text{FACILITY}) \end{pmatrix} \rangle,$$

4.2. Évaluation de l'interopérabilité des sous-systèmes d'information

Nous commençons notre étude par l'analyse de l'interopérabilité de SI_1 vers les sous-systèmes ss_i^2 puis nous analysons ensuite l'interopérabilité de SI_2 vers les sous-systèmes ss_i^1.

4.2.1. Étude de l'interopérabilité de SI_1 vers les sous-systèmes ss_i^2

Cette étude va se baser sur la détermination des métriques généralisées, définies dans le chapitre 3, telles que :

1. $\nu_{1\to ss_i^2} = \frac{|R_c^2(ss_i^2)|}{|R_{c_{expected}}^2(ss_i^2)|}$ pour évaluer l'interopérabilité potentielle de SI_1 vers ss_i^2.
2. $\varepsilon_{1\to ss_i^2} = \frac{|R_c^{2e}(ss_i^2)|}{|R_c^2(ss_i^2)|}$ pour évaluer l'effectivité associée à l'interopérabilité potentielle de SI_1 vers ss_i^2.
3. $\nu^e_{1\to ss_i^2} = \frac{|R_c^{2e}(ss_i^2)|}{|R^2_{c_{expected}}(ss_i^2)|}$ pour évaluer l'interopérabilité effective de SI_1 vers ss_i^2.
4. $\varepsilon^e_{1\to ss_i^2} = \frac{|R_c^{2e}(ss_i^2)|}{|R_c^{2e}(ss_i^2)|} = 100\%$ pour évaluer l'effectivité associée à l'interopérabilité effective de SI_1 vers ss_i^2.

Nous calculons, sur la base des relations R_c^2, les mesures d'interopérabilité pour chacun des blocs sémantiques ss_i^2:

$ss_1^2(\text{Purchase order})$ est le sous-système dont la sémantique est subsumée par le bloc sémantique $SB_1^2(\text{Purchase order})$. Les mesures sont telles que :

$$\nu_{1\to ss_1^2(\text{Purchase order})} = \frac{|R_c^2(ss_1^2(\text{Purchase order}))|}{|R^2_{c_{expected}}(ss_1^2(\text{Purchase order}))|} = \frac{35}{41} = 85\%$$

$$\varepsilon_{1\to ss_1^2(\text{Purchase order})} = \frac{|R_c^{2e}(ss_1^2(\text{Purchase order}))|}{|R_c^2(ss_1^2(\text{Purchase order}))|} = \frac{28}{35} = 80\%$$

$$\nu^e_{1\to ss_1^2(\text{Purchase order})} = \frac{|R_c^{2e} ss_1^2(\text{Purchase order})|}{|R^2_{c_{expected}}(ss_1^2(\text{Purchase order}))|} = \frac{28}{41} = 68\%$$

$$\varepsilon^{e}_{1\to ss_1^2(\text{Purchase order})} = \frac{\left|R_c^{2e}\left(ss_1^2(\text{Purchase order})\right)\right|}{\left|R_c^{2e}(ss_1^2(\text{Purchase order})\ )\right|} = 100\%$$

La mesure de l'interopérabilité potentielle maximale de SI_1 vers $ss_1^2(\text{Purchase order})$ est égale à 85%, et cette interopérabilité est effective à 80%. En revanche la mesure de l'interopérabilité effective minimale indique une valeur de 68% avec une effectivité égale à 100%.

La relation sémantique $R^2_{SB_1^2}$ permet d'identifier les sous-systèmes de SI_1 qui interopèrent avec $ss_1^2(\text{Purchase order})$ et qui sont $ss_1^1(\text{WAREHOUSE})$, $ss_2^1(\text{ORDER_PARTNER})$, $ss_3^1(\text{PARTNER}-\text{ADDRESS})$, $ss_4^1(\text{PARTNER})$, $ss_5^1(\text{WIP}-\text{ORDER})$, $ss_6^1(\text{ORDER}-\text{DETAIL})$, $ss_7^1(\text{ORDER_HEADER})$, $ss_8^1(\text{WIP}-\text{ORDER}-\text{TYPE})$, $ss_{10}^1(\text{PRODUCT})$, $ss_{11}^1(\text{UOM})$ et $ss_{13}^1(\text{FACILITY})$. La relation $R^2_{SB_1^2}$ est telle que :

$$R^2_{SB_1^2} = \langle SB_1^2(\text{Purchase order}), \begin{pmatrix} SB_1^1(\text{WAREHOUSE}), SB_2^1(\text{ORDER_PARTNER}), \\ SB_3^1(\text{PARTNER}-\text{ADDRESS}), SB_4^1(\text{PARTNER}), \\ SB_5^1(\text{WIP}-\text{ORDER}), SB_6^1(\text{ORDER}-\text{DETAIL}), \\ SB_7^1(\text{ORDER_HEADER}), SB_8^1(\text{WIP}-\text{ORDER}-\text{TYPE}), \\ SB_{10}^1(\text{PRODUCT}), SB_{11}^1(\text{UOM}), SB_{13}^1(\text{FACILITY}) \end{pmatrix} \rangle$$

Nous présentons, dans le Tableau 9, l'ensemble des mesures pour les autres sous-systèmes (définis par les blocs sémantiques) :

Tableau 9. Mesure de l'interopérabilité de SI_1 vers les sous-systèmes ss_i^2

Les sous-systèmes de SI_2	**Les mesures d'interopérabilité**
$ss_1^2(\text{Purchase order})$= $ss_2^2(\text{Purchase order quantity})$= $ss_3^2(\text{PurchaseRequestDetail})$= $ss_4^2(\text{PurchaseRequest})$ = $ss_5^2(\text{PurchaseorderStatus})$	$\nu_{1\to ss_1^2(\text{Purchase order})} = 85\%$, $\varepsilon_{1\to ss_1^2(\text{Purchase order})} = 80\%$, $\nu^e_{1\to ss_1^2(\text{Purchase order})} = 68\%$ et $\varepsilon^e_{1\to ss_1^2(\text{Purchase order})}$=100%
$ss_6^2(\text{Supplier})$=$ss_7^2(\text{BusinessPartner})$	$\nu_{1\to ss_6^2(\text{Supplier})} = 100\%$, $\varepsilon_{1\to ss_6^2(\text{Supplier})} = 14\%$, $\nu^e_{1\to ss_6^2(\text{Supplier})} = 86\%$ et $\varepsilon^e_{1\to ss_6^2(\text{Supplier})}$=100%

ss_8^2(Facility)	$\nu_{1\to ss_8^2(\text{Facility})} = 67\%$, $\varepsilon_{1\to ss_8^2(\text{Facility})} = 100\%$, $\nu^e_{1\to ss_8^2(\text{Facility})} = 67\%$ et $\varepsilon^e_{1\to ss_8^2(\text{Facility})}$=100%
ss_9^2(Units)	$\nu_{1\to ss_9^2(\text{Units})} = 100\%$, $\varepsilon_{1\to ss_9^2(\text{Units})} = 50\%$, $\nu^e_{1\to ss_9^2(\text{Units})} = 50\%$ et $\varepsilon^e_{1\to ss_9^2(\text{Units})}$=100%
ss_{10}^2(Product)=ss_{11}^2(ProductFacility)	$\nu_{1\to ss_{10}^2(\text{Product})} = 85\%$, $\varepsilon_{1\to ss_{10}^2(\text{Product})} = 23\%$, $\nu^e_{1\to ss_{10}^2(\text{Product})} = 20\%$ et $\varepsilon^e_{1\to ss_{10}^2(\text{Product})}$=100%

4.2.2.Étude de l'interopérabilité de SI_2 vers les sous-systèmes ss_i^1

Nous récapitulons, dans le Tableau 10, l'ensemble des mesures de chacun des sous-systèmes ss_i^1.

Tableau 10. Mesure de l'interopérabilité de SI_2 vers les sous-systèmes ss_i^1

Les sous-systèmes de SI_1	Les mesures d'interopérabilité
ss_1^1(WAREHOUSE)	$\nu_{2\to ss_1^1(\text{WAREHOUSE})} = \frac{4}{5} = 80\%$ $\varepsilon_{2\to ss_1^1(\text{WAREHOUSE})} = \frac{4}{4} = 100\%$ $\nu^e_{2\to ss_1^1(\text{WAREHOUSE})} = \frac{4}{5} = 80\%$ $\varepsilon^e_{2\to ss_1^1(\text{WAREHOUSE})} = 100\%$
ss_2^1(ORDER_PARTNER)	$\nu_{2\to ss_2^1(\text{ORDER_PARTNER})} = 40\%$ $\varepsilon_{2\to ss_1^1(\text{WAREHOUSE})} = 100\%$ $\nu^e_{2\to ss_1^1(\text{WAREHOUSE})} = 40\%$ $\varepsilon^e_{2\to ss_2^1(\text{ORDER_PARTNER})} = 100\%$
ss_3^1(PARTNER_ADDRESS)	$\nu_{2\to ss_3^1(\text{PARTNER_ADDRESS})} = 75\%$ $\varepsilon_{2\to ss_3^1(\text{PARTNER_ADDRESS})} = 100\%$ $\nu^e_{2\to ss_3^1(\text{PARTNER_ADDRESS})} = 75\%$ $\varepsilon^e_{2\to ss_3^1(\text{PARTNER_ADDRESS})} = 100\%$
ss_4^1(PARTNER)	$\nu_{2\to ss_4^1(\text{PARTNER})} = 50\%$ $\varepsilon_{2\to ss_4^1(\text{PARTNER})} = 100\%$ $\nu^e_{2\to ss_4^1(\text{PARTNER})} = 50\%$ $\varepsilon^e_{2\to ss_4^1(\text{PARTNER})} = 100\%$
ss_5^1(WIP_ORDER)=ss_6^1(ORDER_DETAIL) =ss_7^1(ORDER_HEADER)=ss_8^1(WIP_ORDER_TYPE)	$\nu_{2\to ss_5^1(\text{WIP_ORDER})} = 61\%$ $\varepsilon_{2\to ss_5^1(\text{WIP_ORDER})} = 89\%$ $\nu^e_{2\to ss_4^1(\text{WIP_ORDER})} = 55\%$ $\varepsilon^e_{2\to ss_5^1(\text{WIP_ORDER})} = 100\%$

ss_9^1(PROCESS)	$\nu_{2\to ss_9^1(\text{PROCESS})} = 0\%$ $\varepsilon_{2\to ss_9^1(\text{PROCESS})} = 0\%$ $\nu^e_{2\to ss_9^1(\text{PROCESS})} = 0\%$ $\varepsilon^e_{2\to ss_9^1(\text{PROCESS})} = 0\%$
ss_{10}^1(PRODUCT)	$\nu_{2\to ss_{10}^1(\text{PRODUCT})} = 73\%$ $\varepsilon_{2\to ss_{10}^1(\text{PRODUCT})} = 100\%$ $\nu^e_{2\to ss_{10}^1(\text{PRODUCT})} = 73\%$ $\varepsilon^e_{2\to ss_{10}^1(\text{PRODUCT})} = 100\%$
ss_{11}^1(UOM)	$\nu_{2\to ss_{11}^1(\text{UOM})} = 100\%$ $\varepsilon_{2\to ss_{11}^1(\text{UOM})} = 100\%$ $\nu^e_{2\to ss_{11}^1(\text{UOM})} = 100\%$ $\varepsilon^e_{2\to ss_{11}^1(\text{UOM})} = 100\%$
ss_{12}^1(WIP_ORDER_STATUS)	$\nu_{2\to ss_{12}^1(\text{WIP_ORDER_STATUS})} = 0\%$ $\varepsilon_{2\to ss_{12}^1(\text{WIP_ORDER_STATUS})} = 0\%$ $\nu^e_{2\to ss_{12}^1(\text{WIP_ORDER_STATUS})} = 0\%$ $\varepsilon^e_{2\to ss_{12}^1(\text{WIP_ORDER_STATUS})} = 0\%$
ss_{13}^1(FACILITY)	$\nu_{2\to ss_{13}^1(\text{FACILITY})} = 100\%$ $\varepsilon_{2\to ss_{13}^1(\text{FACILITY})} = 100\%$ $\nu^e_{2\to ss_{13}^1(\text{FACILITY})} = 100\%$ $\varepsilon^e_{2\to ss_{13}^1(\text{FACILITY})} = 100\%$
ss_{14}^1(ORDER_STATUS)	$\nu_{2\to ss_{14}^1(\text{ORDER_STATUS})} = 9\%$ $\varepsilon_{2\to ss_{14}^1(\text{ORDER_STATUS})} = 0\%$ $\nu^e_{2\to ss_{14}^1(\text{ORDER_STATUS})} = 0\%$ $\varepsilon^e_{2\to ss_{14}^1(\text{ORDER_STATUS})} = 0\%$

Voici sur un exemple comment nous pouvons analyser ces résultats. Le système d'information SI_2 interopère avec le sous-système ss_1^1(WAREHOUSE) à travers les sous-systèmes $\begin{pmatrix} SB_1^2(\text{Purchase order}), SB_2^2(\text{Purchase order quantity}), \\ SB_3^2(\text{PurchaseRequestDetail}), SB_4^2(\text{PurchaseRequest}), \\ SB_5^2(\text{PurchaseorderStatus}), SB_8^2(\text{Facility}), \\ SB_{10}^2(\text{Product}), SB_{11}^2(\text{ProductFacility}) \end{pmatrix}$.

La mesure de l'interopérabilité potentielle est égale à 80%, et est totalement effective.

5. Conclusion

Le prototypage de notre approche d'évaluation a permis de faciliter sa mise en application. Par ailleurs, le passage à l'échelle des applications réelles a été réalisé à travers un scénario réaliste d'interopérabilité B2M (Business to Manufacturing). Ce scénario étudie le processus de passation de commande d'achat de la matière première à l'AIPL.

La mise en œuvre de notre approche d'évaluation fournit une carte opérationnelle des niveaux d'interopérabilité effective et potentielle entre les applications et systèmes d'information mis en œuvre entre les différents systèmes hétérogènes existants.

Conclusion générale et Perspectives

1. Conclusion générale

Les travaux de cette thèse se veulent être une contribution au domaine de l'interopérabilité d'entreprise avec un focus particulier sur l'interopérabilité sémantique des systèmes d'entreprise et une application aux systèmes d'information de pilotage de la production.

Nous avons cherché à répondre à la question scientifique :

> Comment évaluer, *a priori*, qualitativement et quantitativement, si l'exigence d'interopérabilité sémantique entre plusieurs systèmes d'entreprise est satisfaite ?

La communauté de recherche nationale (GDR MACS[43], GIS INTEROP-GSO[44], GIS INTEROP-GR[45]) et internationale (IFAC TC 5.3[46], IFIP WG 5.8[47], INTEROP-VLab[48], FInES[49]), ainsi que la communauté industrielle (AFIS[50]) s'intéressent à la problématique de définition des fondements scientifiques de l'interopérabilité des systèmes d'entreprise. L'interopérabilité sémantique en est l'un des piliers.

Dans cette thèse, nous contribuons à cette problématique d'interopérabilité sémantique par une démarche scientifique de caractérisation (Chapitre 1), de formalisation (Chapitre 2), de mesure et d'analyse (Chapitre 3), et de validation (Chapitre 4).

Une analyse bibliographique a montré que les approches généralement proposées se focalisent sur une vue « *macroscopique* » (boîte noire) de l'interopérabilité des systèmes, en proposant des mesures et des modèles de maturité génériques. Ces travaux se justifient, d'une manière complémentaire, par notre positionnement à des niveaux « mésoscopique »

---

[43] GDR MACS : Groupe de Recherche "Modélisation, Analyse et Conduite des Systèmes dynamiques", http://www.univ-valenciennes.fr/GDR-MACS

[44] GIS INTEROP-GSO : Pôle Grand Sud-Ouest Groupement d'Intérêt Scientifique, http://www.interop-gso.net

[45] Groupement d'Intérêt Scientifique INTEROP Grande-Région, http://www.interop-grande-region.eu

[46] IFAC TC 5.3 : International Federation of Automatic Control - Technical Committee 5.3. Enterprise Integration and Networking, http://www.ifac-tc53.org

[47] IFIP WG 5.8 : International Federation for Information Processing - Work Group 5.8 Enterprise Interoperability, http://www.ifip-ei.org

[48] INTEROP-VLab : The International Virtual Laboratory for Enterprise Interoperability, http://www.interop-vlab.eu

[49] FInES : Future Internet Enterprise Systems, http://www.fines-cluster.eu

[50] AFIS : Association Française d'Ingénierie Système, http://www.afis.fr

et « microscopique » (boîte blanche) dans la caractérisation de l'interopérabilité sémantique des systèmes d'entreprise.

Nous avons ainsi proposé une approche et des outils pour :

- Expliciter la sémantique implicite contenue dans les modèles conceptuels des systèmes d'entreprise par une approche de « normation » de ces modèles ;
- Enrichir ces modèles conceptuels normés à travers l'injection des connaissances et des bonnes pratiques des utilisateurs et des experts du domaine ;
- Structurer la sémantique des modèles enrichis et normés sous forme d'agrégats sémantiques ;
- Formaliser les relations sémantiques d'interopérabilité de manière ensembliste.

Nous avons alors défini un système de mesure pour évaluer, *a priori*, le degré d'interopérabilité sémantique des systèmes d'entreprise à travers des métriques formelles. Cette démarche se décompose en plusieurs étapes :

- Formaliser les métriques permettant d'évaluer quantitativement et qualitativement le degré d'interopérabilité potentielle et effective entre deux systèmes d'information devant interopérer ;
- Evaluer l'interopérabilité partielle des systèmes d'information à travers l'étude de l'interopérabilité de leurs sous-systèmes ;
- Proposer une cartographie de l'ensemble des mesures obtenues et en déduire les stratégies d'amélioration à considérer pour atteindre des objectifs fixés ;

Nous avons validé nos propositions au travers :

- Du développement d'un prototype d'outillage permettant de normer et de structurer la sémantique intrinsèque des modèles pour en mesurer le degré d'interopérabilité;
- De l'application de notre approche sur un cas d'étude de dimension réelle dans un contexte industriel.

2. Limites et perspectives de nos travaux

Les travaux présentés dans ce mémoire forment un socle qui ouvre des perspectives intéressantes, à plus ou moins long terme :

1. **Etudier formellement les corrélations possibles entre les métriques d'interopérabilité ($\nu_{1\to2}$ et $\nu_{2\to1}$, par exemple) résultantes de l'amélioration réalisée sur l'un ou l'autres des systèmes d'entreprise impliqués dans un processus d'interopération**

Nous avons montré, dans le chapitre 4, les effets (amélioration ou dégradation) de l'application d'une stratégie de paramétrage ou de personnalisation sur un système d'entreprise. Cette stratégie, qui peut être légère ou très intrusive, influe non seulement

directement sur les mesures d'interopérabilité mais aussi, indirectement, de manière potentiellement corrélée, sur la qualité de l'interopérabilité selon une direction opposée. Il serait intéressant d'étudier plus en détail ces corrélations et leurs effets pour proposer une démarche guidant la spécification et la sélection d'une stratégie de paramétrage et de personnalisation optimale, par rapport à des critères soit objectifs (mesure quantitative), soit subjectifs (mesure qualitative).

2. **Proposer une approche pour aider l'expert à l'identification des relations sémantiques**

Bien que nous ayons postulé, dans nos travaux, que la définition des relations sémantiques entre les concepts des systèmes d'information est réalisée par des experts du domaine, éventuellement outillés pour ce processus, il serait intéressant d'intégrer, dans notre prototype, un tel outillage, automatique ou semi-automatique, adapté à nos besoins de formalisation de la sémantique embarquée dans les modèles.

3. **Lever les hypothèses fortes**

Pour réaliser nos travaux de recherche, nous nous sommes basés sur les hypothèses fortes suivantes :

(H1). Les modèles conceptuels utilisés à l'entrée du processus d'évaluation formalisent la sémantique métier complète des systèmes d'information étudiés.

(H2). La sémantique des systèmes d'information étudiés, dépendante de la connaissance métier de ces systèmes, est garantie par des experts du domaine dont nous ne remettons pas en cause les conclusions.

Lever l'hypothèse (H1) nécessite de faciliter et outiller l'étape consistant à enrichir les modèles conceptuels avec la sémantique tacite souvent définie par des pratiques d'entreprise (Lezoche, Panetto et Aubry 2011).

Lever l'hypothèse (H2) impliquerait, pour partie, la spécification et le développement d'un outillage de vérification de la cohérence, de la consistance et de la complétude de la sémantique des modèles. Ceci reste encore une problématique ouverte sur laquelle travaillent de nombreux chercheurs des communautés informatique (Velardi, Fasolo et Pazienza 1991) , et gestion - extraction des connaissances (Lieber, et al. 2006).

4. **Apport de notre approche d'évaluation formelle sur les modèles de maturité**

Nos travaux proposent des métriques quantitatives (interopérabilité potentielle et effective) auxquelles sont associées des métriques qualitatives (effectivité). Ces métriques pourraient

être couplées à des modèles de maturité standardisés par l'industrie (CMMI[51]) afin de faciliter leur exploitation et la prise de décision lors d'une évolution de la maturité d'une entreprise donnée.

[51] CMMI : Capability Maturity Model Integration, http://www.sei.cmu.edu/cmmi/

Liste des Acronymes

AFIS : Association Française d'Ingénierie Système
AIPL : Atelier Inter-établissements de productique de Lorraine
B2B : Business to Business
B2M : Business to Manufacturing
C4ISR : Computerized Command Control Communications Intelligence Surveillance
CAD : Computer Aided Design
CIM : Computation Independant modele
CIM : Computer Integrated Manufacturing
CMMI : Capability Maturity Model Integration
COTS : Commercial Off The Shelf
ERP : Enterprise Resource Planning
IAM : Interoperability Assessment Model
IS : Ingénierie Système
LCI : Layers of Coalition Interoperability
LCIM : Levels of Conceptual Interoperability Model
LISI : Levels of Information Systems Interoperability
MCISI : Military Communication & Information Systems Interoperability
MES : Manufacturing Enterprise System
OA : Ordre d'Achat
OF : Ordre de Fabrication
OIAM : Organizational Interoperability Agility Model
OIM : Organizational Interoperability Model
SdS : Système de Systèmes
SdSI : Système de Systèmes d'Information
SE : Système d'Entreprise
SI : système d'Information
SoIM : System of Interoperability Model
SoSI : System of Systems Interoperablity
UML : Unified Modelling Language
XML : Extensible Markup Language
XSLT : eXtensible Stylesheet Language Transformation

Liste de figures

Figure 1. Objectif et contribution de recherche 13
Figure 2. Méthodologie de recherche proposée par (Peffers, Tuunanen et Rothenberger 2007) 14
Figure 3. Instanciation de la méthodologie de recherche proposée par (Peffers, Tuunanen et Rothenberger 2007) 14
Figure 4. Structure du manuscrit de thèse 16
Figure 5. Stratégies mises en place par les entreprises en réseau (Camarinha-Matos et Afsarmanesh 2008) 18
Figure 6. Les typologies de réseau d'entreprises (Jagdev et Thoben 2001) 19
Figure 7.Tendance à la mise en œuvre d'une chaîne logistique (source CSC®) 20
Figure 8. Systèmes d'entreprises collaboratives avec les différents points de mesures 21
Figure 9. Les revenus des licences des logiciels assurant l'Intégration des Applications d'Entreprise. Source Yankee Group 2001 27
Figure 10. Le budget d'implémentation des systèmes 27
Figure 11. Dualité interopérabilité / interopération (Figure adaptée de (Ducq 2007)) 30
Figure 12. Les propriétés définissant le potentiel d'interopérabilité d'un système (Daclin, Chen et Vallespir 2006) 31
Figure 13. Matrice des mesures de la compatibilité (Ducq et Chen 2008) 32
Figure 14. Les deux indicateurs IE et II pour déterminer le degré de couplage des informations de la Supply Chain (Barut, Faisst et Kanet 2002) 34
Figure 15. Évaluation de la performance d'une entreprise 36
Figure 16. Les deux approches de calcul des coûts (Tassey, Brunnermeier et Martin 1999) 37
Figure 17. Propriétés de l'interopération 46
Figure 18. Notre approche d'évaluation d'interopérabilité sémantique 48
Figure 19. Structure du chapitre 2 49
Figure 20. Étapes de la conception d'un système d'information. Source cours ingénierie de connaissance 52
Figure 21. Les typologies de conflit .Source (Park et Ram 2004) 53
Figure 22. Deux extraits de modèles conceptuels 56
Figure 23. L'approche de conceptualisation et d'explicitation de la sémantique. Source (Lezoche, Panetto et Aubry 2011). 58
Figure 24. Deux extraits de modèles conceptuels 60
Figure 25. Méta-modèle des concepts lexicaux et non lexicaux 61
Figure 26. Les règles de transformation utilisant la syntaxe d'UML (Lezoche, Panetto et Aubry 2011) 62
Figure 27. Les modèles conceptuels de la Figure 24 transformés selon le paradigme « fact-oriented modelling » 62
Figure 28. Méta-modèle de l'architecture du bloc sémantique 68
Figure 29. Un modèle conceptuel 69
Figure 30. Le modèle conceptuel de la Figure 29 transformé selon le paradigme « fact-oriented modelling » 70

Figure 31. Le graphe des dépendances sémantiques associé au modèle conceptuel de la Figure 30. 72
Figure 32. Le graphe des composantes fortement connexes associé au graphe des dépendances sémantiques de la Figure 30 74
Figure 33. Le Bloc Sémantique $SB2 = SBc\mathrm{C2}, \mathrm{C5}$ du modèle conceptuel de la Figure 30 78
Figure 34. Extrait du modèle conceptuel formalisant la sémantique de $\mathrm{SBC2}, \mathrm{C5}$ 78
Figure 35. Structure du chapitre 3 79
Figure 36. Les différentes configurations de l'écart sémantique entre l'ensemble des concepts des systèmes d'information $SI1$ et $SI2$ respectivement notés $CSI1$ et $CSI2$ 80
Figure 37. Propriétés de l'interopération 82
Figure 38. Couplage des systèmes d'information. Source (Autran, et al. 2008) 89
Figure 39. Cartographie des mesures d'interopérabilité sémantique 99
Figure 40. Couplage des systèmes d'information. Source (Autran, et al. 2008) 100
Figure 41. Matrice de couplage des systèmes d'information interopérant enrichie par les cartographies des mesures 100
Figure 42. Deux configurations possibles (interopérabilité partielle (a) et non-interopérabilité totale (b)) entre un sous-système ssi2 de $SI2$ et le système $SI1$. 102
Figure 43. Les relations sémantiques entre les blocs sémantiques se basant sur la Figure 17 104
Figure 44. Évaluation de l'interopérabilité entre $SI1$ et un sous-système $SI2$ 105
Figure 45. Les métriques ν déterminées pour chacun des sous-systèmes de $CSI2$ 106
Figure 46 .Méta-modèle de notre approche d'évaluation de l'interopérabilité 111
Figure 47. Modèle conceptuel de Flexnet pour l'enregistrement, l'exécution et le suivi du bon de commande 113
Figure 48. Modèle conceptuel de Sage X3 pour l'élaboration du bon de commande 114
Figure 49. Modèle conceptuel de Flexnet enrichi et normé selon la perspective « fact-oriented modelling » 115
Figure 50. Modèle conceptuel de SAGE X3 enrichi et normé selon la perspective « fact-oriented modelling » 115
Figure 51. Les blocs sémantiques identifiés dans le modèle conceptuel de Flexnet de la Figure 49. 116
Figure 52. Le modèle conceptuel associé au bloc sémantique $BPRODUCT$ 117
Figure 53. Cartographie des mesures d'interopérabilité sémantique pour les deux directions d'interopérabilité 125
Figure 54. Dégradation de la mesure de l'interopérabilité effective $\nu 2 \rightarrow 1$ eaprès amélioration de la mesure $\nu 1 \rightarrow 2$ e 129
Figure 55. Effets de l'évaluation de l'interopérabilité MES $(\mathrm{SI1})$ vers l'ERP $(\mathrm{SI2})$ 131

Liste des tableaux

Tableau 1. Évaluation de l'interopérabilité potentielle d'un système vs. Évaluation de l'interopérabilité entre plusieurs systèmes extrait de (Guédria, Naudet et Chen 2008)..... 35
Tableau 2. Caractérisation des modèles de maturité (Panetto 2006) 35
Tableau 3. Les caractéristiques des mesures ..... **Erreur ! Signet non défini.**
Tableau 4. Positionnement de notre approche 45
Tableau 5. Les différentes configurations de l'interopérabilité sémantique entre deux systèmes d'information $SI1$ et $SI2$ 93
Tableau 6. Les conclusions liées à l'interopérabilité issues de l'analyse des valeurs des couples $\nu 1 \rightarrow 2, \varepsilon 1 \rightarrow 2$ et $\nu 1 \rightarrow 2\,\mathrm{e}, \varepsilon 1 \rightarrow 2\mathrm{e}$ 98
Tableau 7.Les blocs sémantiques de Flexnet $(SI1)$ 117
Tableau 8. Les blocs sémantiques de Sage X3 $(SI2)$ 118
Tableau 9. Mesure de l'interopérabilité de $SI1$vers les sous-systèmes $ssi2$ 137
Tableau 10. Mesure de l'interopérabilité de SI2vers les sous-systèmes ssi1 138

Bibliographie

Aleman-Meza, Boanerges., C. Halaschek, I.B. Arpinar, et A. Sheth. «Context-aware semantic association ranking.» Proceedings of the 1st International Workshop on Semantic Web and Database , SWDB'03. Berlin, Germany, 2003. 33-50.

Amanowicz, M., et P. Gajewski. «Military communications and information systems interoperability.» Proceedings of the Military Communications Conference, MILCOM'96. 1996. 280-283.

Anaya, V., G. Berio, M. Harzallah, P. Heymans, R. Matulevicius, A.L. Opdahl, H. Panetto, M.J. Verdecho. «The Unified Enterprise Modelling Language--Overview and further work.» Computers in Industry (Elsevier) 61, n° 2 (2010): 99-111.

Arnold, S., et P. Brook. «Managing the Wood not the Trees –The Smart Acquisition Approach to Systems of Systems.» Proceedings of the 11th annual Symposium of INCOSE. Melbourne, Australia, 2001.

ATHENA. «Advanced Technologies for Interoperability of Heterogeneous Enterprise Networks.» FP6-2002-IST1, Integrated Project Proposal, 2003.

Autran, F., J.P. Auzelle, D. Cattan, J.L. Garnier, D. Luzeaux, F. Mayer, M. Peyrichon, et J.R. Ruault. «Coupling Component Systems towards Systems of Systems.» In 18th Annual International Symposium of INCOSE, 6th Biennal European System Engineering Conference. Utrecht, Pays-Bas , 2008.

Auzelle, J.P. Proposition d'un cadre de modélisation multi-échelles d'un système d'information en entreprise centré sur le produit. Thèse de doctorat, Université Henri Poincaré, Nancy I, 2009.

Barut, M., W. Faisst, et J.J. Kanet. «Measuring supply chain coupling: an information system perspective.» European Journal of Purchasing and Supply Management 8, n° 3 (2002): 161-171.

Benhlima, L., et D. Chiadmi. «Vers l'interopérabilité des systèmes d'information hétérogènes.» la revue électronique des technologies de l'information e-TI, 2006.

Bianchini, D., V. De Antonellis, M. Melchiori, et D. Salvi. «Semantic-enriched service discovery.» ICDEW '06 Proceedings of the 22nd International Conference on Data. Atlanta, GA, USA: IEEE Computer Society Washington, DC, USA, 2006. 38-48.

Bititci, U.S., V. Martinez, P. Albores, et J. Parung. «Creating and managing value in collaborative networks.» Édité par Emerald Group Publishing Limited. International Journal of Physical Distribution and Logistics Management 34, n° 3/4 (2004): 251--268.

Blanc, S. Contribution à la caractérisation et à l'évaluation de l'interopérabilité pour les entreprises collaboratives. Thèse de doctorat, Université Bordeaux 1, 2006.

C4ISR, Interoperability Working group. “Levels of information systems interoperabilty (LISI).” Architectures Working Group report, US Department of defense, Washington, DC, 1998.

Camara, M., Y. Ducq, et R. Dupas. «Methodology for Prior Evaluation of Interoperability.» Collaborative Networks for a Sustainable World, Proceedings of the 11th IFIP WG 5.5 Working Conference on Virtual Enterprises, PRO-VE 2010. St. Etienne, France, 2010. 697-704.

Camarinha-Matos, L., et H. Afsarmanesh. Collaborative Networks: Reference Modeling. Édité par L. Camarinha-Matos et H. Afsarmanesh. Springer-Verlag New York Inc, 2008.

Camarinha-Matos, L.M., et H. Afsarmanesh. «Concept of collaboration.» Encyclopedia of networked and virtual organizations (Information Science Reference), 2008: 311-315.

Carney, D., D. Fisher, et P. Place. «Topics in Interoperability: System-of-Systems Evolution.» Technical Note, Univeristy of Pittsburgh, Software Engineering Institute, 2005.

Castano, S., et V. De Antonellis. «A framework for expressing semantic relationships between multiple information systems for cooperation.» Information Systems (Elsevier) 23, n° 3-4 (May-June 1998): 253-277.

Chapurlat, V. «Vérification et validation de modèles de systèmes complexe : application à la modélisation d'entreprise.» Habilitation à Diriger les Recherches de l’Université de Montpellier 2, 2007.

Chen, D., B. Vallespir, et N. Daclin. «An approach for enterprise interoperability measurement.» Proceedings of the workshop MoDISE-EUS, Model Driven Information Systems Engineering: Enterprise, User and System Models, MoDISE-EUS'08. Montpellier, France, 2008.

Chen, D., M.Dassisti, B.Elvesaeter, H.Panetto, N.Daclin, F.W. Jaekel, T.Knothe, A. Solberg, V. Anaya, R. Sanchis, et al. «Enterprise Interoperability-Framework and Knowledge corpus.» Deliverable DI.2, INTEROP-NOE FP6 IST-2003-508011, 2006.

Chen, D., et N. Daclin. «Barriers driven methodology for enterprise interoperability.» Proceeding of Eighth IFIP Working Conference on Virtual Enterprises: Establishing the

foundation of collaborative networks, IFIP TC 5 Working Group 5.5. Guimaraes, Portugal: Springer Verlag, 2007. 453-460.

Chen, P. «Architecture-Based Interoperability Evaluation in Evolutions of Networked Enterprises.» in LNCS 3812 of Business Process Management Workshops. Nancy, France: Lecture Notes in Computer Science, Volume 3812, 2005. 293--304.

Cheng, C.P., G.T. Lau, J. Pan, K.H. Law, et A. Jones. «Domain-specific ontology mapping by corpus-based semantic similarity.» Proceedings of 2008 NSF CMMI Engineering Research and Innovation Conference. Knoxville, Tennessee, USA, 2008.

Chiang, R.H.L., T.M. Barron, et V.C. Storey. «Reverse engineering of relational databases: Extraction of an EER model from a relational database.» Data and Knowledge Engineering 12, n° 2 (1994): 107--142.

Choi, N., I.Y. Song, et H. Han. «A survey on ontology mapping.» ACM Sigmod Record (ACM) 35, n° 3 (2006): 34-41.

Clark, T., et R. Jones. «Organisational interoperability maturity model for C2.» In Proceedings of the Command And Control Research And Technology Symposium (CCRTS). Newport, RI, USA, 1999.

COM. «communication de la commission au conseil et au parlement europeen-L'interopérabilité des services paneuropéens d'administration en ligne.» 45 final, Bruxelles, Belgique, 2006.

Combemale, B. and Rougemaille, S., X. Crégut, F. Migeon, M. Pantel, et C. Maurel. «Expériences pour décrire la sémantique en ingénierie des modèles.» Édité par Laurence Duchien et Cédric Dumoulin. Actes des 2 èmes journées sur l'Ingènierie Dirigèe par les Modèles IDM 06. Lille, France, 2006. 17-33.

Daclin, N., D. Chen, et B. Vallespir. «Enterprise interoperability measurement-Basic concepts.» Proceedings of the 3rd Workshop on Enterprise Modeling and Ontologies for Interoperability. Luxembourg, Luxembourg, 2006.

Daclin, N., et V. Chapurlat. «Evaluation de l'Interopérabilité Organisationnelle et Managériale des Systèmes Industriels: le projet Carioner.» 2008.

David, J., et J. Euzenat. «Comparison between ontology distances (preliminary results).» Proceedings the semantic web: ISWC 2008: 7th International Semantic Web Conference. Karlsruhe, Germany: Springer, 2008. 245-260.

De Bo, J., P. Spyns, et R. Meersman. «Creating a “DOGMAtic” multilingual ontology infrastructure to support a semantic portal.» In proceedings of the OTM confederated international workshops HCI-SWWA, IPW, JTRES, WORM, WMS, and MRSM. Catania , Italie: Springer-Verlag New York Inc, 2003. 253-266.

Denise, L. «Collaboration vs. C-three (cooperation, coordination, and communication).» Innovating 7, n° 3 (1999).

Ducq, Y. Évaluation de la performance d’entreprise par les modèles. HDR, Bordeaux: Université Bordeaux 1, 2007.

Ducq, Y., et D. Chen. «How to measure interoperability: Concept and Approach.» Proceedings of the 14th International Conference on Concurrent Enterprising: ICE2008A-New Wave of Innovation in Collaboration Networks. Lisbon, Portugal, 2008. 583-590.

EIF. «European Interoperability Framework (EIF) for European public services.» 2010.

EIF. « European Interoperability Framework for pan-European eGovernment Services,Interoperable Delivery of European eGovernment Services to public Administrations,Businesses and Citizens (IDABC).» 2004.

Engelbart, D.C. Augmenting human intellect: A conceptual framework. Summary Report AFOSR-3233, Menlo Park, CA, USA: Standord Reasearch Institute , 1962.

Euzenat, J. «Towards a principled approach to semantic interoperability.» Proceedings of the workshop on Ontologies and Information Sharing IJCAI-01. Seattle, USA, 2001.

Evans, V. «Lexical concepts, cognitive models and meaning-construction.» Édité par Walter de Gruyter. Cognitive Linguistics 17, n° 4 (2006): 491-534.

Evermann, J. «Theories of meaning in schema matching: An exploratory study.» Information Systems (Elsevier) 34, n° 1 (2009): 28-44.

Fenton, N.E., et S.L. Pfleeger. Software metrics: a rigorous approach. Chapman and Hall, 1991.

Fisher, D.A. An Emergent Perspective on Interoperation in Systems of Systems. Technical report, CMU/SEI-2006-TR-003, ESC-TR-2006-003, Pittsburgh, PA: Carnegie Mellon University, Software Engineering Institute, 2006.

Fonkam, M., et W. Gray. «An Approach to Eliciting the Semantics of Relational Databases.» In proceeding of CAiSE'92, Lecture Notes in Computer Science 593 Springer. Manchester, UK, 1992. 463-480.

Ford, T., J. Colombi, S. Graham, et D. Jacques. «The Interoperability Score.» Proceeding of the 5th Conference on Systems Engineering Research. 2007.

Gallaher, M.P., A.C. O'Conno, J.L Dettbarn, et L.T. Gilday. Cost Analysis of Inadequate Interoperability in the U.S. Capital Facilities Industry. NIST GCR 04-867, Gaithersburg, Maryland: US Dept. of Commerce, Technology Administration, National Institute of Standards and Technology, http://www.arc-corporate.com/_pdf/NISTstudy.pdf, 2004.

Gamma, E., R. Helm, R. Johnson, et J. Vlissides. Design patterns: elements of reusable object-oriented software. Vol. 206. Addison-wesley Reading, MA, 1995.

Goguen, J., et R. Burstall. «Introducing institutions.» Logics of Programs (Springer), 1984: 221-256.

Goguen, J.A. «Data, schema, ontology and logic integration.» Logic Journal of IGPL (Oxford Univ Press) 13, n° 6 (2005): 685-715.

Goh, C.H., S.E. Madnick, et M.D. Siegel. Ontologies, contexts, and mediation: representing and reasoning about semantics conflicts in heterogeneous and autonomous systems. Working paper, Cambridge, MA, USA: Sloan School of Management, Massachusetts Institute of Technology, 1995.

Guarino, N. «Formal Ontology and Information Systems.» Proceedings of FOIS'98. Trento, Italy , 1998. 3-15.

Guédria, W., Y. Naudet, et D. Chen. «Interoperability Maturity Models--Survey and Comparison.» Proceedings of the OTM Confederated International Workshops and Posters on On the Move to Meaningful Internet Systems: 2008 Workshops. Springer Verlag, 2008. 273-282.

Halpin, T. «Fact-oriented modeling: Past, present and future.» Édité par A. Opdahl & S. Brinkkemper J. Krogstie. Conceptual Modelling in Information Systems Engineering (Springer Berlin Heidelberg), 2007: 19-38.

Halpin, T. «Object-role modeling (ORM/NIAM).» Édité par K. Mertins & G. Schmidt P. Bernus. Handbook on Architectures of Information Systems (Springer Heidelberg), 2006: 81-103.

He, K.Q., J. Wang, et P. Liang. «Semantic Interoperability Aggregation in Service Requirements Refinement.» Journal of Computer Science and Technology (Springer) 25, n° 6 (2010): 1103-1117.

Himmelman, A.T. «On coalitions and the transformation of power relations: Collaborative betterment and collaborative empowermen.» American Journal of Community Psychology 29, n° 2 (2001): 277-284.

IEC 62264-1. Enterprise-control system integration, Part 1. Models and terminology. Geneva, Switzerland: ISO/IEC, 2002.

IEEE. «Standard Computer Dictionary - A Compilation of IEEE Standard Computer Glossaries.» Standard Computer Dictionary - A Compilation of IEEE Standard Computer Glossaries. New York, 1990.

INCOSE. INCOSE Systems Engineering Handbook: A Guide for Life Cycle Processes and Activities, Version 3. Édité par C. Haskins. The International Council on Systems Engineering, 2006.

Isaac, A., S. Wang, C. Zinn, H. Matthezing, L. van. der, et S. Schlobach. «Evaluating thesaurus alignments for semantic interoperability in the library domain.» IEEE Intelligent Systems (IEEE Computer Society) 24, n° 2 (2009): 76-86.

ISO FDIS 11354-1. «Advanced automation technologies and their applications-Requirements for establishing manufacturing enterprise process interoperability - part 1: framework for enterprise interoperability.» TC 184/SC 5, ISO, Geneva, Switzerland, 2010.

ISO 14528. Automation Systems – Concepts and rules for Enterprise Models, Modelling and architecture. TC 184/SC5/WG1, Geneva, Switzerland: ISO/IEC, 1999.

ISO EN DIS 19440. Enterprise integration - Constructs of enterprise modelling, Draft version. TC 184/SC5/WG1, Geneva, Switzerland: ISO/IEC, 2004.

Jagdev, H.S., et K.D Thoben. «Anatomy of enterprise collaborations.» Taylor and Francis Ltd. Production Planning and Control 12, n° 5 (2001): 437--45.

Jochem, R. «Enterprise Interoperability assessmen.» Proceedings of the 8th International Conference of Modeling and Simulation, MOSIM'10. Hammamet, Tunisia, 2010.

Jung, J.J. «Reusing ontology mappings for query routing in semantic peer-to-peer environment.» Information Sciences (Elsevier) 180, n° 17 (2010): 3248-3257.

Kaffenberger, R., et J. Fischer. «Designing Systems of Systems Without Getting Trapped in the Subsystem Maze.» Proceedings of the 11th annual Symposium of INCOSE. Melbourne, Australia, 2001.

Kalfoglou, Y., et M Schorlemmer. «IF-Map: An ontology-mapping method based on information-flow theory.» Journal on Data Semantics, 2003: 98--127.

Kalfoglou, Y., et M. Schorlemmer. «Ontology mapping: the state of the art.» The knowledge engineering review (Cambridge Univ Press) 18, n° 1 (2003): 1-31.

Kasunic, M., et W., Anderson. Measuring Systems Interoperability: Challenges and Opportunities. Tech. Note CMU/SEI-2004-TN-003, Pittsburgh, PA: Carnegie-Mellon University—Software Engineering Institute, 2004.

Kavouras, M. «A unified ontological framework for semantic integration.» International Workshop on Next Generation Geospatial Information. Boston MA, USA, 2003.

Kochhar, A., et Y. Zhang. «A framework for performance measurement in virtual.» Proceedings of the 2nd International Workshop on Performance Measurement. Hanover, Germany, 2002. 2--11.

LaVean, G. «Interoperability in defense communications.» IEEE Transactions on Communications 28, n° 9 (1980): 1445-1455.

Leite, M.J. «Interoperability Assessment.» Proceedings of the 66th MORS Symposium Naval, Post Graduate School . Monterey, California, 1998.

Lezoche, M., H. Panetto, et A. Aubry. «Conceptualisation approach for cooperative information systems interoperability.» In Proceedings of 13th International Conference on Enterprise Information Systems. Beijing, China, 2011.

Lieber, J., A. Napoli, L. Szathmary, et Y. Toussaint. «First elements on Knowledge Discovery guided by Domain Knowledge (kddk).» Proceedings of the 4th international conference on Concept lattices and their applications. Tunis, Tunisia: Springer-Verlag, 2006. 22-41.

Lusthaus, C., M.H. Adrien, G. Anderson, F. Carden, et G. Plinio-Montalvan. Évaluation organisationnelle: cadre pour l'amélioration de la performance. Laval, Canada: International Development Research Centre, 2003.

Maedche, A., B. Motik, N. Silva, et R. Volz. «MAFRA—A mapping framework for distributed ontologies.» Proceedings of 13th European Conference on Knowledge Engineering and Knowledge Management (EKAW). Siquenca, Spain: Springer, 2002. 69-75.

Maier, M. W. «Architecting Principles for Systems-of-Systems.» Proceedings of the 6th Annual Symposium of INCOSE. Boston, MA, 1996. 567-574.

Mallek, S., N. Daclin, et V. Chapurlat. «Toward a conceptualisation of interoperability requirements.» Enterprise Interoperability IV: Making the Internet of the Future for the Future of Enterprise, 2010: 439-448.

Masolo, C., S. Borgo, A. Gangemi, N. Guarino, et A. Oltramari. «WonderWeb Deliverable D18--Ontology Library (final).» Deliverable 18, , ST Project 2001-33052 WonderWeb: Ontology Infrastructure for the Semantic Web, 2003, Deliverable 18.

Mensh, D.R., R.S. Kite, et P.H. Darby. «The Quantification of Interoperability.» Naval Engineers Journal (Wiley Online Library) 101, n° 3 (1989): 251-259.

Monperrus, M. La mesure des modèles par les modèles : une approche générative. Thèse de doctorat, Université de Rennes 1, 2008.

Nijssen, G.M., et T.A Halpin. Conceptual Schema and Relational Database Design: a fact oriented approach. Upper Saddle River, NJ, USA: Prentice-Hall, 1989.

Oberndorf, Patricia. COTS and Open Systems. Technical report, PA 15213-3890, Pittsburgh, Pennsylvania, USA: Software Engineering Institute. Carnegie Mellon University, 1998.

Panetto, H. Meta-modèles et modèles pour l'intégration et l'interopérabilité des applications d'entreprises de production. HDR, Nancy: Nancy Université, 2006.

Panetto, H. «Towards a classification framework for interoperability of enterprise applications.» International Journal of Computer Integrated Manufacturing (Taylor & Francis) 20, n° 8, (December 2007): 727-740.

Park, J., et S. Ram. «Information systems interoperability: What lies beneath?» ACM Transactions on Information Systems (TOIS 22, n° 4 (2004): 595--632.

Peffers, K., T. Tuunanen, et M.A. et Chatterjee, S Rothenberger. «A design science research methodology for information systems research.» *Journal of Management Information Systems* 24, n° 3 (2007): 45--77.

Rahm, E., et P.A. Bernstein. «A survey of approaches to automatic schema matching.» the VLDB Journal (Springer) 10, n° 4 (2001): 334-350.

Reed, S.L., et D.B. Lenat. «Mapping ontologies into Cyc.» Proceedings of AAAI 2002 Conference Workshop on Ontologies For The Semantic Web. Edmonton, Canada, 2002. 1-6.

Santos, I., S. Schuster, M. Vergara, et J. Alonso. «Assessing the Readiness for Enterprise Collaboration and Enterprise Interoperability.» Proceedings of 14th International Conference on Concurrent Enterprising ICE. Lisbon, Portugal, 2008.

Sharir, M. «A strong-connectivity algorithm and its applications in data flow analysis.» Computers and Mathematics with Applications (Elsevier) 7 (1981): 67-72.

Sheth, A., B. Aleman-Meza, I.B. Arpinar, C. Bertram, Y. Warke, C. Ramakrishanan, C. Halaschek, K. Anyanwu, D. Avant, F.S. Arpinar. «Semantic association identification and knowledge discovery for national security applications.» Journal of Database Management (Citeseer) 16, n° 1 (2005): 33-53.

Shilliday, A., J. Taylor, M. Clark, et S. Bringsjord. «Provability-Based Semantic Interoperability for Information Sharing and Joint Reasoning.» Proceeding of the conference on Ontologies and Semantic Technologies for Intelligence. IOS Press, 2010. 109-128.

Stroetmann, V., JM Rodrigues, et K. Stroetmann. «Conceptual Framework for eHealth Interoperability.» Deliverable 1.1 of the SemanticHEALTH Project, 2006.

Tassey, G., S.B. Brunnermeier, et S.A Martin. «Interoperability cost analysis of the US automotive supply chain.» Research Triangle Institute Final Report. RTI Project 7007-03, 1999.

Thoben, K.D., et H.S. Jagdev. «Typological issues in enterprise networks.» Édité par Taylor and Francis Ltd. Production Planning and Control 12, n° 5 (2001): 421--436.

Tolk, A. «Beyond technical interoperability-Introducing a reference model for measures of merit for coalition interoperability.» Proceedings of the 8th International Command and Control Research and Technology Symposium (ICCRTS). Washington, DC, 2003.

Tursi, A., H. Panetto, G. Morel, et M. Dassisti. «Ontological approach for products-centric information system interoperability in networked manufacturing enterprises.» IFAC Annual Reviews in Control (Elsevier) 33, n° 3 (2009): 238-245.

U.S. Census Bureau. Annual Value of Construction Set In Place. http://www.census.gov/const/C30/total.pdf, 2004.

Vegetti, M., G.P. Henning, et H.P. Leone. «Product ontology: definition of an ontology for the complex product modelling domain.» Proceedings of the Mercosur Congress on Process Systems Engineering. Rio de Janeiro, Brazil, 2005.

Velardi, P., M. Fasolo, et M.T. Pazienza. «How to encode semantic knowledge: a method for meaning representation and computer-aided acquisition.» Computational Linguistics (MIT Press) 17, n° 2 (1991): 153--170.

Wang, G., J. Goguen, Y.K. Nam, et K. Lin. «Critical points for interactive schema matching.» Advanced Web Technologies and Applications (Springer), 2004: 654-664.

Yahia, E., A. Aubry, et H. Panetto. «Explicitation de la sémantique de modèles de systèmes d'information d'entreprise.» 4èmes Journées Doctorales , Journées Nationales MACS, JD-JN-MACS. Marseille, France, 2011.

Yahia, E., J. Yang, A. Aubry, et H. Panetto. «On the Use of Description Logic for Semantic Interoperability of Enterprise Systems» Proceedings of the OTM Confederated International Workshops and Posters on On the Move to Meaningful Internet Systems: OTM 2009 Workshops, EI2N 2009. Villamoura, Portugal: Springer verlag, Lecture Notes in Computer Science, LNCS 5872, 2009. 205-215.

Yahia, E., M. Lezoche, A. Aubry, et H. Panetto. «Semantics enactment in Enterprise Information Systems.» Proceedings of the 18th IFAC World Congress, Elsevier - IFACPapersOnline. Milan, Italy, 2011.

Zouggar, N. Contribution au développement de la sémantique en modélisation d'entreprise. Thèse de doctorat, Université Bordeaux 1, 2009.

Zuse, H. Software Complexity. Berlin: Walter de Gruyter, 1991.

Titre : Contribution à l'évaluation de l'interopérabilité sémantique entre systèmes d'information d'entreprise : Application aux systèmes d'information de pilotage de la production

Résumé : Les travaux présentés dans ce mémoire s'inscrivent dans le contexte de systèmes d'entreprises collaboratives. Nous défendons l'intérêt d'évaluer l'interopérabilité étant donné que la question de l'interopérabilité voire plutôt celle de la non-interopérabilité pose de nombreuses problématiques pour les industriels. En effet, la non-interopérabilité engendre des coûts non négligeables dus principalement au temps et aux ressources mises en place pour développer des interfaces d'échange des informations. Ceci influe sur la performance globale des entreprises et précisément sur les coûts et les délais d'obtention des services attendus. Nous proposons ainsi une approche pour mesurer, a priori, le degré d'interopérabilité (ou de non interopérabilité) entre modèles conceptuels de systèmes d'information d'entreprise, afin de donner à une entreprise la possibilité d'évaluer sa propre capacité à interopérer et donc de prévoir les éventuels problèmes avant la mise en place d'un partenariat. Il s'agit ainsi de définir des indicateurs et des métriques tant quantitatifs que qualitatifs, permettant de qualifier l'interopérabilité entre les systèmes d'entreprises et de proposer des stratégies d'amélioration lorsque le niveau d'interopérabilité est évalué comme insuffisant.

Mots-clés : Interopérabilité, systèmes d'information, conceptualisation, modèle sémantique, mesure, évaluation

Title: Contribution to semantic interoperability assessment for enterprise information systems: application to the manufacturing enterprise environment

Abstract: Within the context of collaborative enterprise information systems, these works aim to propose an approach for assessing the interoperability and the non-interoperability. In fact, the non-interoperability poses a series of challenging problems to the industrial community. Indeed, the non-interoperability leads to significant costs. The majority of these costs are attributable to the time and resources spent to put in place interfaces for exchanging information. This mainly affects enterprise global performance by increasing the cost and the delay to obtain the expected services. We suggest to address enterprise interoperability measurement in order to allow to any enterprise to fully evaluate, a priori, its own capacity to interoperate, and therefore to anticipate possible problems before a partnership. Our works consist in defining indicators and metrics to quantify and then to qualify the interoperability between the enterprise systems and to propose some improvement strategies when the evaluated interoperability level is not sufficient.
Keywords: Interoperability, information systems, conceptualisation, semantic models, measure, evaluation