

ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE
UNIVERSITÉ DU QUÉBEC

MÉMOIRE PRÉSENTÉ À
L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE

COMME EXIGENCE PARTIELLE
À L'OBTENTION DE LA
MAÎTRISE EN GÉNIE DE LA PRODUCTION AUTOMATISÉE
M. Sc. A.

PAR
Éric DESBIENS

DÉMARCHE D'INTÉGRATION DES SYSTÈMES D'EXÉCUTION DE LA
FABRICATION

MONTRÉAL, LE 10 DÉCEMBRE 2013

©Tous droits réservés, Éric Desbiens, 2013

©Tous droits réservés

Cette licence signifie qu'il est interdit de reproduire, d'enregistrer ou de diffuser en tout ou en partie, le présent document. Le lecteur qui désire imprimer ou conserver sur un autre média une partie importante de ce document, doit obligatoirement en demander l'autorisation à l'auteur.

CE MÉMOIRE A ÉTÉ ÉVALUÉ

PAR UN JURY COMPOSÉ DE :

M. Amin Chaabane, directeur de mémoire
Département de génie de la production automatisée à l'École de technologie supérieure

M. Marc Paquet, président du jury
Département de génie de la production automatisée à l'École de technologie supérieure

M. James Lapalme, membre du jury
Département de génie logiciel et des TI à l'École de technologie supérieure

IL A FAIT L'OBJET D'UNE SOUTENANCE DEVANT JURY ET PUBLIC

LE 19 NOVEMBRE 2013

À L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE

REMERCIEMENTS

La réalisation de cette maîtrise n'aurait pas été possible sans la contribution de plusieurs personnes qui ont été une source d'inspiration et de support tout au long de ce projet. Tout d'abord, je remercie mon employeur – par le biais de Luc, Paul, Michel, Annie et Marc – qui m'ont apporté chacun à leur façon, le soutien nécessaire à l'accomplissement de cette Maîtrise.

Je remercie également mes parents Pieret et Richard, qui avec leur fierté, m'ont insufflé la motivation à mener à terme ce projet. Claudette, merci de tes encouragements et de ton aide quand nous en avions besoin. Enfin, André et Ginette, merci de m'avoir écouté parler à maintes reprises de mon projet. Vous m'avez permis d'avoir un regard extérieur sur mes accomplissements.

Amin, mon directeur de recherche, tu as cru dès le départ à ce projet. Tu m'as guidé et m'as soutenu tout au long de cette aventure.

Ce mémoire a été un travail familial. Sans le soutien de mes enfants Léa, Ève et Jade, rien de tout cela n'aurait été possible.

Finalement, Marie-Josée, une grande partie de cette maîtrise t'appartient. Sans ton soutien au cours des quatre dernières années, cet accomplissement n'aurait pas été possible. Toujours, au cours des longues heures de travail qui ont été nécessaires à la réalisation de ma maîtrise, j'ai senti ton appui.

DÉMARCHE D'INTÉGRATION DES SYSTÈMES D'EXÉCUTION DE LA FABRICATION

Éric DESBIENS

RÉSUMÉ

Il y a consensus, que le MES est un élément clé pour une entreprise manufacturière qui veut améliorer sa productivité, la qualité de ses produits et garder le contrôle sur ses frais d'exploitation. Cependant, sa mise en place nécessite beaucoup de temps et d'argent en plus de la collaboration entre plusieurs personnes de disciplines différentes.

La contribution principale de ce mémoire est de proposer une méthode pour faire l'analyse systématique des processus d'affaires d'une entreprise manufacturière en accord avec le modèle d'intégration de la norme ISA-95 et en utilisant la notation BPMN pour en faire la modélisation. De cette méthode, une démarche d'intégration est proposée pour identifier les ressources de l'entreprise à inclure dans le MES, modéliser les processus d'affaires et valider ce qui a été configuré dans le MES.

Cette démarche d'intégration a été validée dans le contexte réel d'une entreprise manufacturière. Le processus de validation a permis de conclure que la modélisation avec trois niveaux de détails alignée avec les modèles d'ISA-95 facilite la collaboration entre les intervenants de disciplines différentes et permet d'identifier tous les éléments nécessaires à la configuration et à l'exécution des processus dans un MES.

De plus, avec l'utilisation du langage B2MML développé par ISA-95, il a été possible de quantifier la correspondance entre les éléments identifiés lors de la modélisation et le MES.

Mots-clés : Système d'exécution de la fabrication (MES), ISA-95, BPMN, processus d'affaires.

DÉMARCHE D'INTÉGRATION DES SYSTÈMES D'EXÉCUTION DE LA FABRICATION

Éric DESBIENS

ABSTRACT

There is consensus that an MES is a key element for a manufacturing company that needs to improve its productivity, product quality and maintain control over its operating cost. However, the project implementation requires the dedication of time and money in addition to the collaboration between several groups of people from different disciplines.

The main contribution of this dissertation is to propose a method for the systematic analysis of the business processes of a manufacturing company in accordance with the integration model proposed by ISA-95 standard and using the BPMN notation as the modeling language. In this method, an integrative approach is proposed to identify the resources of the company to be included in the MES model business processes and validate what has been configured in the MES.

This integration was validated in the context of a real manufacturing company. The validation process concluded that the modeling of three levels of detail aligned with ISA-95 models, facilitates collaboration between stakeholders from different disciplines and identifies all the elements necessary for the configuration and the process execution in a MES.

In addition, with the use of B2MML language developed by ISA-95, it was possible to quantify the correspondence between the elements identified in the modeling and MES.

Keywords: Manufacturing Execution System (MES), ISA-95, BPMN, business processes.

TABLE DES MATIÈRES

	Page
INTRODUCTION	1
CHAPITRE 1 PROBLÉMATIQUE ET OBJECTIFS DE RECHERCHE.....	5
CHAPITRE 2 REVUE DE LITTÉRATURE	9
2.1 Introduction.....	9
2.2 Définition et normalisation	10
2.3 Architectures	12
2.4 Problèmes d'intégration	14
2.5 Démarche vers l'intégration.....	16
2.6 Sélection de MES.....	17
2.7 Amélioration continue	18
2.8 Modélisation de processus MES	21
2.9 Évaluation des notations	21
2.10 Synthèse	22
CHAPITRE 3 MÉTHODOLOGIE	25
3.1 Introduction.....	25
3.2 BPMN et la hiérarchie des fonctions	26
3.3 BPMN et la hiérarchie des équipements	27
3.4 BPMN et les modèles objet.....	29
3.5 Identification	34
3.6 Modélisation	37
3.7 Validation.....	41
3.8 Conclusion	45
CHAPITRE 4 DÉMARCHE D'INTÉGRATION	47
4.1 Introduction.....	47
4.2 Étape 1 – Identifier les fonctions de l'entreprise à inclure	47
4.3 Étape 2 – Identifier le modèle physique de l'entreprise	48
4.4 Étape 3 – Faire la modélisation dans la sous-classe descriptive	50
4.5 Étape 4 – Faire la modélisation dans la sous-classe analytique.....	51
4.6 Étape 5 – Faire la modélisation dans la sous-classe d'exécutable commun	54
4.7 Étape 6 – Configurer le MES.....	55
4.8 Étape 7 – Validation.....	55
4.8.1 Validation de la définition	55
4.8.2 Validation de l'ordonnancement de la production.....	59
4.8.3 Validation de la performance de la production.....	61
4.8.4 Calcul de la conformité	63
4.9 Conclusion	67

CHAPITRE 5 VALIDATION DE LA DÉMARCHE PROPOSÉE	69
5.1 Introduction.....	69
5.2 Fonction de l'entreprise	70
5.3 Modèle physique de l'entreprise	71
5.4 Modélisation dans la sous-classe descriptive.....	73
5.5 Modélisation dans la sous-classe analytique.....	74
5.6 Modélisation dans la sous-classe exécutable commun	78
5.7 Configuration des systèmes	80
5.8 Validation de la définition	81
5.8.1 Validation de la définition de produit	81
5.8.2 Validation des segments de processus	85
5.8.3 Mesure de conformité de la définition	89
5.9 Validation de l'ordonnancement de la production.....	91
5.9.1 Mesure de la conformité	93
5.10 Validation de la performance de la production.....	95
5.10.1 Mesure de la conformité	97
5.11 Synthèse	98
5.12 Conclusion	100
CONCLUSION GÉNÉRALE.....	101
ANNEXE I ISA-95.....	107
ANNEXE II BPMN 2.0	113
ANNEXE III TABLEAUX DE VALIDATION DE LA DÉMARCHE.....	119
ANNEXE IV TABLEAU DE LA DÉMARCHE D'INTÉGRATION	131
ANNEXE V EXEMPLE DE MESSAGE B2MML.....	135
RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....	137

LISTE DES TABLEAUX

	Page	
Tableau 2.1	Types de gaspillage adaptés au SI	19
Tableau 2.2	Synthèse des sujets de la revue de littérature.....	24
Tableau 3.1	Corrélation entre BPMN 2.0 et la hiérarchie des équipements.....	28
Tableau 3.2	BPMN en relation avec les modèles objet ISA-95 (analytique).....	31
Tableau 3.3	BPMN en relation avec les modèles objet ISA-95 (exécutable commun)	33
Tableau 3.4	BPMN en relation avec les modèles objet ISA-95 (descriptive)	33
Tableau 3.5	Utilisation de l'objet de données pour représenter la matière.....	38
Tableau 3.6	Représentation des paramètres reliés aux activités	40
Tableau 3.7	Identification du type de PMÉ	40
Tableau 4.1	Correspondance des modèles objets avec les activités MOM	48
Tableau 4.2	Tableau d'identification du modèle physique de l'entreprise.....	49
Tableau 4.3	Extension des artefacts BPMN pour le « PMÉ 1 ».....	53
Tableau 4.4	Éléments de la sous-classe exécutable commun pour le « PMÉ 1 »	57
Tableau 4.5	Éléments de la sous-classe analytique pour le « PMÉ 1 ».....	57
Tableau 4.6	Éléments de la sous-classe descriptive pour le « processus d'affaires 1 »	58
Tableau 4.7	Éléments de la sous-classe analytique pour le produit X.....	58
Tableau 4.8	Éléments de la sous-classe exécutable commun pour le PMÉ 1	60
Tableau 4.9	Éléments de la sous-classe analytique pour le produit X.....	60
Tableau 4.10	Éléments de la sous-classe exécutable commun pour la pièce A	61
Tableau 4.11	Éléments de la sous-classe analytique pour le produit X.....	62

Tableau 4.12	Validation détaillée pour le « PMÉ 1 ».....	63
Tableau 4.13	Valeurs de e_{ij} et S_{ij} pour le « Processus d'affaire 1 ».....	64
Tableau 4.14	Validation détaillée pour le processus d'affaires 1	65
Tableau 4.15	Valeurs de a_j et S_j pour l'ensemble des processus d'affaires.....	66
Tableau 5.1	Fonctions de l'entreprise faisant partie du projet d'intégration	70
Tableau 5.2	Modèle physique de l'entreprise « Z »	72
Tableau 5.3	Extensions du processus d'affaires « Fabrication du câble »	76
Tableau 5.4	Extensions du PMÉ « Assemblage Câble ».....	79
Tableau 5.5	PMÉ « Assemblage câble » dans la définition de produit	83
Tableau 5.6	Processus d'affaires « Fabrication du câble » – définition de produit.....	84
Tableau 5.7	PMÉ « Assemblage Câble » dans le segment de processus.....	86
Tableau 5.8	Processus d'affaires « Fabrication du câble » – segment de processus	87
Tableau 5.9	Ensemble des processus d'affaires pour le site St-Laurent.....	88
Tableau 5.10	Valeurs de e_{ij} et S_{ij} pour la « Fabrication du câble ».....	89
Tableau 5.11	Valeurs de a_j et S_j pour les processus d'affaires du site St-Laurent.....	90
Tableau 5.12	PMÉ « Assemblage Câble » dans l'ordonnancement	92
Tableau 5.13	Processus d'affaire « fabrication du câble » dans l'ordonnancement	92
Tableau 5.14	Valeurs de e_{ij} et S_{ij} pour le « Fabrication du câble ».....	93
Tableau 5.15	Valeurs de a_j et S_j pour les processus d'affaires du site St-Laurent.....	94
Tableau 5.16	PMÉ « Assemblage Câble » dans la performance	95
Tableau 5.17	Processus d'affaires « Fabrication du câble » dans la performance	96
Tableau 5.18	Ensemble des processus d'affaires pour le site St-Laurent.....	96
Tableau 5.19	Valeurs de e_{ij} et S_{ij} pour le « Fabrication du câble ».....	97

Tableau 5.20	Valeurs de a_j et S_j pour les processus d'affaires du site St-Laurent.....	98
Tableau 5.21	Synthèse des mesures de conformité	99

LISTE DES FIGURES

	Page
Figure 1.1	Modèle d'activité de la gestion des opérations de production 6
Figure 1.2	Démarche d'intégration des MES 7
Figure 2.1	Modèle « <i>Plant to enterprise (P2E)</i> » de l'association MESA 11
Figure 2.2	SOA pour une vision manufacturière 13
Figure 2.3	Cartographie de chaîne de valeur ajoutée avec la terminologie ISA-95 20
Figure 3.1	Correspondance entre hiérarchie des fonctions et sous-classes BPMN 27
Figure 3.2	Interaction entre les modèles objet de la norme ISA-95 29
Figure 3.3	Utilisation d'une extension pour un PMÉ dans différents objets ISA-95 32
Figure 3.4	Illustration d'un segment de processus sur différents niveaux 33
Figure 3.5	Illustration des correspondances entre les éléments BPMN et les objets ISA-95 34
Figure 3.6	Modèle d'activité générique de la gestion des opérations manufacturières 35
Figure 3.7	Modèle hiérarchique des équipements 36
Figure 3.8	Interaction entre les modèles objets de la norme ISA-95 en couleur 39
Figure 3.9	Intégration d'un MES avec un ERP en utilisant la norme B2MML 42
Figure 3.10	Processus de validation avec le BPMN et la norme ISA-95 42
Figure 3.11	Illustration d'une transaction de type <i>GET-SHOW</i> 43
Figure 4.1	Hiérarchie des équipements vus en arbre 49
Figure 4.2	Exemple de modélisation dans la sous-classe descriptive 51

Figure 4.3	Exemple de modélisation dans la sous-classe analytique	52
Figure 4.4	Exemple de modélisation dans la sous-classe d'exécutable commun.....	54
Figure 4.5	Exemple de message B2MML pour une requête de type « GET »	56
Figure 4.6	Exemple de message B2MML pour une réponse de type « SHOW ».....	56
Figure 5.1	Processus d'affaires « Fabrication du câble ».....	69
Figure 5.2	Ensemble des processus d'affaires.....	73
Figure 5.3	Processus d'affaires « Fabrication du câble ».....	74
Figure 5.4	Exemple de données liées à une tâche dans Visio	75
Figure 5.5	PMÉ « Assemblage Câble »	78
Figure 5.6	Exemple de requête B2MML pour la définition de produit « Câble »	82
Figure 5.7	Illustration de la transaction pour la validation du produit « Câble »	82
Figure 5.8	Requête B2MML pour le PMÉ « Assemblage câble ».....	86

LISTE DES ABRÉVIATIONS, SIGLES ET ACRONYMES

ANP	Analytic Network Process
B2MML	Business to Manufacturing Markup Language
BPMN	Business Process Modeling Notation (Notation de modélisation des processus d'affaires)
DCS	Distributed Control System (Système de contrôle distribué)
DMAIC	Définir, Mesurer, Analyser, Innover, Contrôler
EPC	Event-driven Process Chain
ERP	Enterprise Ressources Planning (système intégré d'entreprise)
HMS	Holonic Manufacturing System
ISA	International Society of Automation
MES	Manufacturing Execution Systems (système d'exécution de la fabrication)
MESA	Manufacturing Enterprise Solutions Association
MOM	Manufacturing Operation Management (Gestion des opérations manufacturières)
NIIIP/SMART	National Industrial Information Infrastructure Protocols / Solutions for MES Adaptable Replicable Technology
OMG	Object Management Group
OTDR	Optical time-domain reflectometer (réflectomètre optique temporel)
PCS	Process control system (comme les PLC et les DCS)
PLC	Programmable Logic Controller
PME	Petites et Moyennes Entreprises
PMÉ	Processus Métier Élémentaire
SAP	Systems, Applications and Products (Éditeur d'ERP)

SOA	Service Oriented Architecture (architecture orientée service)
TI	Technologie de l'information
TIDE	Technologie Insertion Demonstration and Evaluation
UML	Unified Modeling Language
VSM	Value Stream Mapping (cartographie de chaîne de valeur ajoutée)
WIP	Work in progress (encours)
XML	Extensible Markup Language
XSD	XML Schema Definition

INTRODUCTION

Ces vingt dernières années, les systèmes d'exécution de la fabrication – en anglais *manufacturing execution system* (MES) – ont pris un essor important dans les entreprises souhaitant améliorer leur productivité et leur profitabilité. Cependant, ces systèmes souvent complexes ne sont pas encore la norme dans beaucoup d'entreprises et tout particulièrement dans les petites et moyennes entreprises (PME).

Ce sont les fabricants d'automates et de systèmes de contrôle qui ont contribué les premiers au développement des systèmes MES. Les éditeurs de systèmes intégrés – *Enterprise ressources planning* (ERP) – ont vite fait d'emboiter le pas pour développer leurs propres solutions et ainsi profiter de l'opportunité existante entre les systèmes de contrôle et les ERP. Ces deux groupes de joueurs ont contribué au développement des MES avec des fonctionnalités diverses comme l'acquisition de données, la gestion des ressources, la gestion des processus et la planification. Cette situation a été propice à l'émergence de définitions divergentes de ce que doit accomplir un MES. Plus récemment, le comité ISA-95 a contribué à mieux définir le rôle et les fonctions des MES.

Plus précisément, le MESA (*Manufacturing Enterprise Solutions Association*) et la norme ISA-95 ont contribué à mieux définir le rôle des MES en identifiant les fonctions de l'entreprise et en proposant un lexique et des modèles pour faciliter l'échange de données entre plusieurs systèmes. Ces initiatives ont poussé les éditeurs à proposer des MES plus homogènes, permettant ainsi une intégration horizontale et verticale plus facile. Malgré ces avancées, les MES demeurent sous-utilisés dans les entreprises manufacturières. Tous les travaux d'intégration entre les MES et les autres systèmes de l'entreprise, visant une collaboration en temps réel avec les données du MES, auront leur pleine valeur lorsque les MES seront pleinement présents dans les entreprises.

L'expérience de modéliser les processus d'affaires d'une entreprise, sous forme de diagramme, dans le but de faire l'intégration d'un système d'exécution de la fabrication, a fait naître l'idée de mettre en commun la structure apportée par la norme ISA-95 et la force d'un modèle de notation graphique, pour faciliter l'intégration de nouveau processus d'affaires dans un MES existant ou à venir. C'est donc essentiellement à l'intégration de ces nouveaux processus que s'adresse la démarche présentée dans ce mémoire. Par ailleurs, les concepts d'intégration d'applications d'entreprise (IAE) qui vise l'intégration verticale et horizontale d'application hétérogène ne seront pas en reste grâce à l'utilisation de la norme ISA-95 qui trouve sa raison d'être dans ces concepts d'intégration. Dans le contexte du MES, l'intégration se dit verticale lorsqu'il s'agit d'intégrer les activités du MES à un système de gestion qui se situe à un niveau plus élevé de l'entreprise (par exemple un ERP) et horizontale lorsqu'il s'agit d'intégré des activités du MES avec d'autres activités du même niveau.

Déjà, certaines publications (Ricken et Vogel-Heuser, 2010; Witsch et Vogel-Heuser, 2011) s'intéressent à la modélisation des MES à partir de modèles graphiques reconnus par l'industrie comme UML (*Unified Modeling language*) et BPMN (*Business Process Modeling Notation*). Selon Witsch et Vogel-Heuser (2011) le BPMN, développé par OMG (*Object Management Group*), semble être la notation de modélisation la plus puissante pour modéliser un processus d'affaires compréhensible par les différentes disciplines de l'entreprise. De plus, l'utilisation de la norme ISA-95 pour créer les spécifications est une stratégie déjà utilisée par plusieurs auteurs (He, Lobov et Martinez Lastra, 2012; Scholten, 2007).

L'objectif de ce mémoire est donc de proposer une démarche d'intégration des MES. Ainsi, le premier chapitre de ce mémoire présente en détail la problématique et les objectifs de la recherche autour de cette idée. Afin de bien situer la recherche, le chapitre 2 présente une revue de la littérature qui met en perspective les travaux de la communauté universitaire et de l'industrie sur le sujet des MES. Au chapitre 3, la méthodologie présente en détail les liens entre différents concepts clés de la norme ISA-95 et des éléments d'un modèle de notation

graphique. Cette méthodologie est ensuite utilisée pour proposer une démarche d'intégration qui est finalement appliquée dans un cas réel d'une entreprise manufacturière. À la toute fin, les résultats obtenus sont discutés pour mettre en lumière les avantages, les problèmes rencontrés et les idées de recherche future sur ce sujet.

CHAPITRE 1

PROBLÉMATIQUE ET OBJECTIFS DE RECHERCHE

La mise en place d'un MES est un processus qui peut s'avérer complexe. D'un côté, les entreprises manufacturières sont très diversifiées et chacune a leurs façons de faire; les instruments (machines, automates, robot) utilisés sont variés, les produits fabriqués sont de nature différente d'une entreprise à l'autre et les produits évoluent dans le temps à l'intérieur d'une même organisation. La combinaison de ces facteurs fait de chaque usine une entité unique, même lorsqu'elles se trouvent au sein d'une même entreprise. Howells (2000) mentionne que c'est dans l'usine que les différences d'une entreprise à l'autre s'observent et c'est aussi dans l'usine que l'on trouve les données d'affaires. L'introduction d'un MES doit donc tenir compte de ces facteurs en plus de tenir compte des autres systèmes déjà en place comme les ERP, les outils d'aide à la décision et les infrastructures TI en général.

De l'autre côté, les intervenants dans un projet d'intégration de MES sont très différents. En plus d'avoir une façon unique de travailler, ils viennent souvent de disciplines différentes. Tout au long du projet, des ingénieurs sont appelés à travailler de concert avec des intégrateurs de système, des analystes de système TI et des gestionnaires. Inévitablement, chacun de ces intervenants a ses propres vues et objectifs sur le système qui doit être mis en place. Voilà pourquoi chaque usine a ses processus d'affaires plus ou moins documentés et dans des formats tout aussi diversifiés que les employés qui les ont créés. C'est la compréhension de ces processus, documentés de façon non structurée, qui est à la base de tout projet d'intégration de système MES. Dans ces conditions, il n'est pas surprenant que les projets d'intégration deviennent des projets plus gros que prévu.

Aujourd'hui, il n'y a pas de modèles qui permettent à des intervenants de disciplines différentes d'utiliser un langage commun et compréhensible. Déjà, quelques outils existent pour aider à l'intégration. Premièrement, Scholten (2007) a publié un guide sur l'application de la norme ISA-95 qui, en plus de présenter et d'expliquer les modèles définis dans la partie

un et deux de la norme, décrit une méthode permettant d'expliciter les exigences de l'entreprise dans le but de faire l'implantation d'un MES aligné avec ISA-95. Deuxièmement, la norme ISA-95 est en soi un outil important puisqu'elle définit une terminologie commune, pour les systèmes de gestion des opérations manufacturière, largement acceptée par l'industrie.

D'autre part, plusieurs modèles de notation existent. Ils sont issus de domaines variés comme UML pour la conception logicielle et EPC pour la modélisation de processus d'affaires (notamment utilisé pour l'ERP SAP). Le BPMN, aussi utilisé pour la modélisation de processus d'affaires, offre une grande quantité d'artéfacts qui permettent de faire le diagramme des processus de l'entreprise avec plusieurs niveaux de détails. Néanmoins, malgré tous les outils disponibles, il n'y a pas d'outils formels de modélisation ayant pour but d'aider à la sélection, l'intégration et la validation d'un MES.

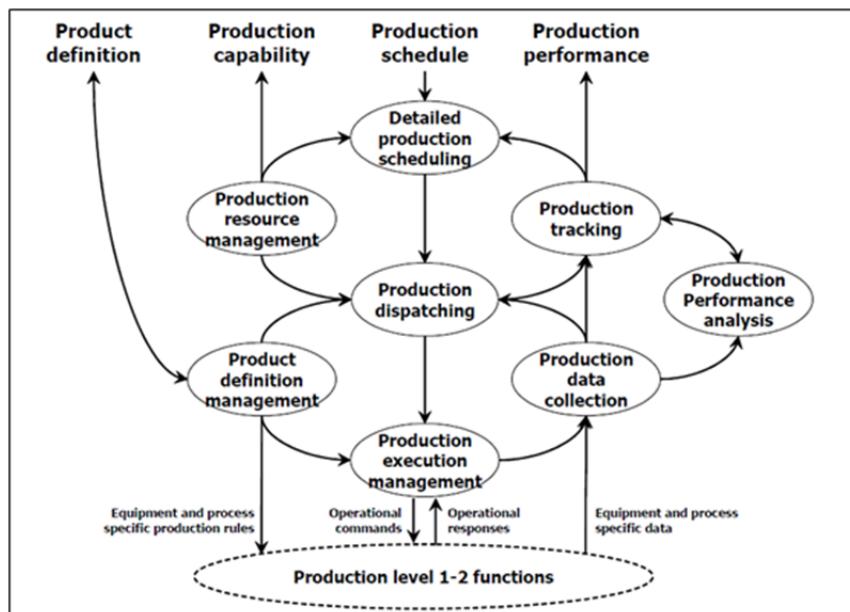


Figure 1.1 Modèle d'activité de la gestion des opérations de production

Tiré d'ISA-95 (2005)

Afin de sélectionner un MES qui répond le plus fidèlement aux besoins de l'entreprise, l'objectif général de ce travail de recherche est de proposer un modèle faisant une analyse

systématique des besoins en MES à partir du modèle d'entreprise (*business model*) en accord avec le modèle d'activité (Figure 1.1) et les modèles d'intégration de la norme ISA-95. Plus spécifiquement, le premier objectif est de vérifier si des liens créés entre la norme ISA-95 et un modèle de notation déjà reconnue dans l'industrie permettent d'identifier les éléments nécessaires à la mise en place d'un MES et de modéliser un processus d'affaires destiné à la fabrication d'un produit. Le second objectif est de vérifier le cycle d'intégration en faisant la validation entre le modèle et le nouveau système mis en place en utilisant les messages B2MML d'ISA-95 (figure 1.2). Enfin, le dernier objectif est de quantifier la conformité entre les processus d'affaires modélisés et les éléments validés en utilisant les messages B2MML.

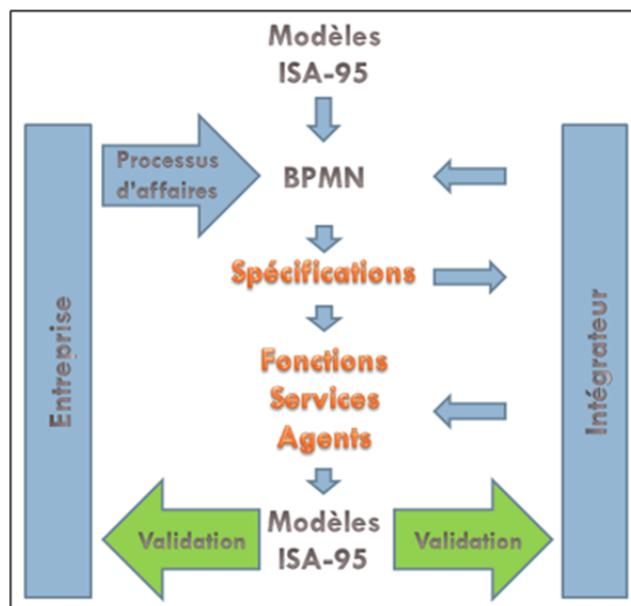


Figure 1.2 Démarche d'intégration des MES

CHAPITRE 2

REVUE DE LITTÉRATURE

2.1 Introduction

Ce chapitre met en perspective les travaux de la communauté universitaire et de l'industrie sur le sujet des MES. Les MES sont présents dans l'industrie depuis plus de 25 ans et grâce à des groupes de travail, comme le MESA et ISA-95, le rôle qui leur est attribué converge de plus en plus vers une définition commune. Cependant, l'utilisation de MES dans les entreprises manufacturières n'est pas aussi systématique que celle des ERP.

Un large éventail de publications traite des différentes architectures des MES. Ces architectures, inspirées par les TI, sont en constante évolution. De plus en plus, les systèmes vont vers des technologies qui promeuvent la collaboration entre les systèmes, par exemple les architectures orientées services (MESA, 2008).

Dans un premier temps, la revue de littérature définit le rôle du MES basé sur les différents travaux de la communauté scientifique et de l'industrie et présente les différentes architectures utilisées pour ce type de système. Ensuite, l'intégration des MES est abordée autant du point de vue des problèmes rencontrés et des solutions apportées par différents groupes de travail que de celui de la sélection d'un nouveau système. Par la suite, puisque le MES est un système d'information axé sur des processus qui sont en constante amélioration, une section est dédiée à l'aspect de l'amélioration continue d'un point de vue des TI. Finalement, l'aspect de la modélisation de processus d'affaires et d'évaluation des notations est abordé dans le but de bien comprendre comment l'utilisation de notation visuelle peut aider à la modélisation de processus d'affaires dans le but de les intégrer à un MES.

2.2 Définition et normalisation

C'est le MESA International qui a fait les premiers pas dans la normalisation des MES. L'association se présente comme une collectivité mondiale de manufacturiers, de producteurs, de chefs d'industrie et de fournisseurs de solutions qui est axée sur l'amélioration de la gestion des opérations en utilisant des solutions technologiques basées sur les règles de l'art (MESA, 2012). En plus de promouvoir la norme ISA-95, d'avoir un large éventail de publications sur les sujets de la fabrication et d'avoir publié leur modèle des onze fonctions principales des MES, ce sont eux qui ont proposé une définition formelle:

« Les MES fournissent des informations permettant l'optimisation des activités de production de la mise en production jusqu'aux produits finis. En utilisant des données actuelles et exactes, le MES guide, initie, réagit et fait rapport sur les activités de l'usine au fur et à mesure qu'elles se produisent. La réponse rapide à des conditions changeantes qui en résultent, couplées avec un accent sur la réduction des activités sans valeur ajoutée, permet des opérations et des processus efficaces. En plus d'améliorer le rendement des actifs opérationnels, les MES améliorent les délais de livraison, la rotation des stocks, la marge brute, et la performance des liquidités. Les MES fournissent des informations vitales sur les activités de production dans l'entreprise et dans la chaîne d'approvisionnement par l'intermédiaire des communications bidirectionnelles. » (MESA, 1997)

Suite à cette définition proposée par le MESA et au besoin grandissant d'intégration entre la gestion et l'exécution, l'International Society of Automation (ISA) a créé la norme ISA-95. La norme définit une terminologie uniformisée et propose trois modèles principaux permettant de faciliter l'intégration des MES avec les systèmes ERP et avec les autres systèmes MES.

Ces trois modèles sont le modèle hiérarchique, le modèle fonctionnel de flux de données et le modèle objet d'information (ISA-95, 2000). Cette norme est maintenant largement acceptée par les acteurs du marché pour la conception de flux d'information entre les applications au niveau de l'atelier et celles à un niveau supérieur. Elle permet aussi à l'industrie d'avoir une terminologie cohérente (De Ugarte, Artiba et Pellerin, 2009).

Au cours des années, le MESA a fait évoluer considérablement son modèle fonctionnel (figure 2.1). Le modèle original des 11 fonctions, publié pour la première fois en 1992, définissait uniquement les fonctions d'opération. Le modèle actuel développé en 2008 (MESA, 2011) englobe maintenant tous les niveaux de l'entreprise, soit les niveaux stratégique, tactique et opérationnel.

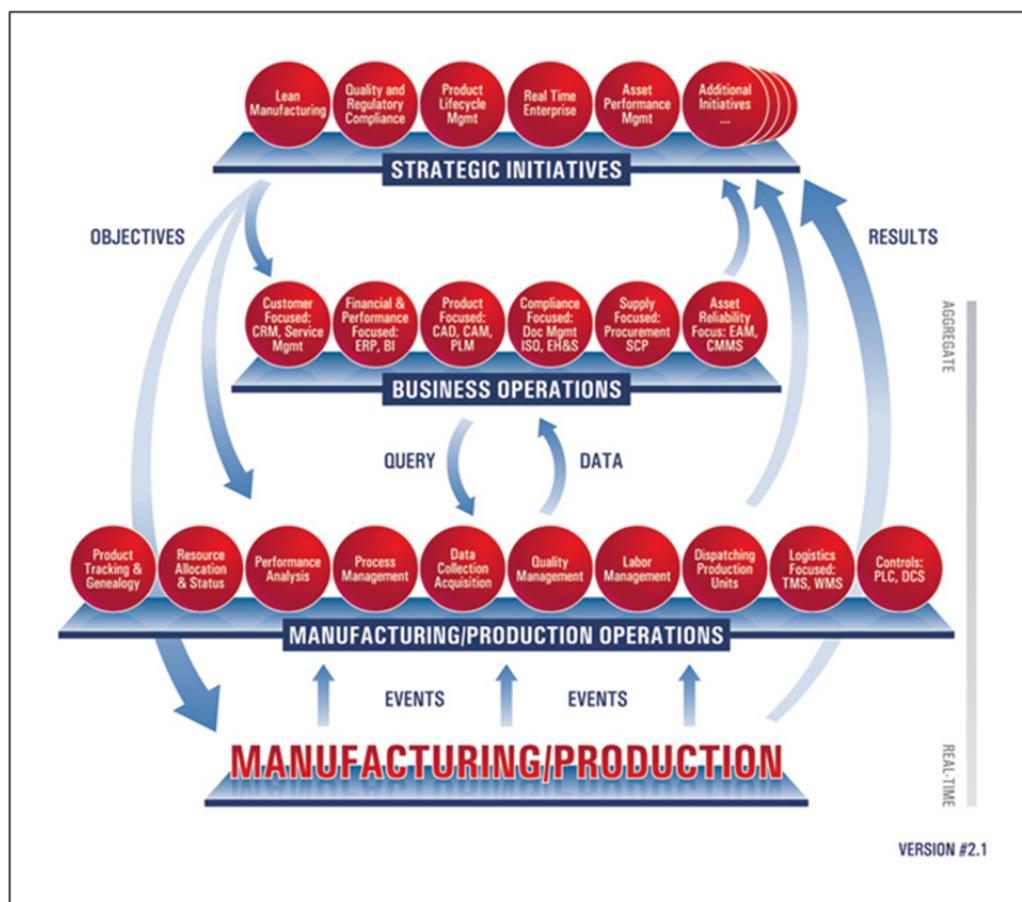


Figure 2.1 Modèle « *Plant to enterprise (P2E)* » de l'association MESA

Tiré de MESA (2011)

Les travaux du MESA et de l'ISA, effectués en étroite collaboration avec l'industrie, ont permis de définir les composantes de base du MES. Cela s'est avéré être une étape importante dans la transition des MES faits sur mesure vers les MES pseudo-normalisés (Cottyn et al., 2011). Par ailleurs, selon Cottyn, Stockman et Van Landeghem (2008) la norme ISA-95 est – ou devrait être – la base de tous les logiciels de production.

2.3 Architectures

Depuis leurs débuts, les technologies du MES ont évolué. Au commencement, des applications remplissant des rôles de fabrication bien précis étaient développées sans accorder d'importance à l'interaction entre les différentes activités de la production. Aujourd'hui, on retrouve dans les entreprises beaucoup d'architectures client-serveur. Ces architectures ont permis d'intégrer toutes les fonctions du MES sur une plateforme uniforme et de centraliser l'information. Avec le besoin d'intégration intra et extra entreprise et avec le développement constant des technologies de l'information (TI), de nouvelles architectures ont fait leur apparition et sont la source de nombreuses publications scientifiques.

La multiplication des systèmes d'information dans les entreprises a entraîné une augmentation importante des coûts reliés aux problèmes d'intégration, de maintenance et de mise à niveau de ces systèmes. Ce problème a poussé les spécialistes en TI à développer des architectures plus flexibles et plus agiles, dont l'utilisation et l'entretien sont moins couteux. L'une de ces architectures est l'architecture orientée services (SOA). La définition de la SOA est une architecture d'application dans laquelle toutes les fonctions sont définies comme des services indépendants avec des interfaces invocables bien définies qui peuvent être sollicitées dans des séquences définies pour créer des processus d'entreprise (Channabasavaiah, Holley et Tuggle, 2004). Le MESA a produit un document de présentation technique pour appliquer la SOA dans un environnement manufacturier. La présentation conclut que quand bien même la technologie pour supporter la SOA dans le domaine manufacturier est clairement arrivée, le fait est que la plupart des manufacturiers n'ont pas vraiment progressé pour le moment dans cette lancée. Même s'il semble y avoir une reconnaissance générale sur la nécessité d'une progression et que de nombreuses entreprises aient des initiatives en cours de développement dans ce domaine, le processus sera plutôt évolutif qu'une révolution jetant les bases d'une nouvelle architecture (MESA, 2008). Le MESA conclut que dans l'évolution de la SOA appliquée au domaine manufacturier, la norme ISA-95 peut jouer un rôle central.

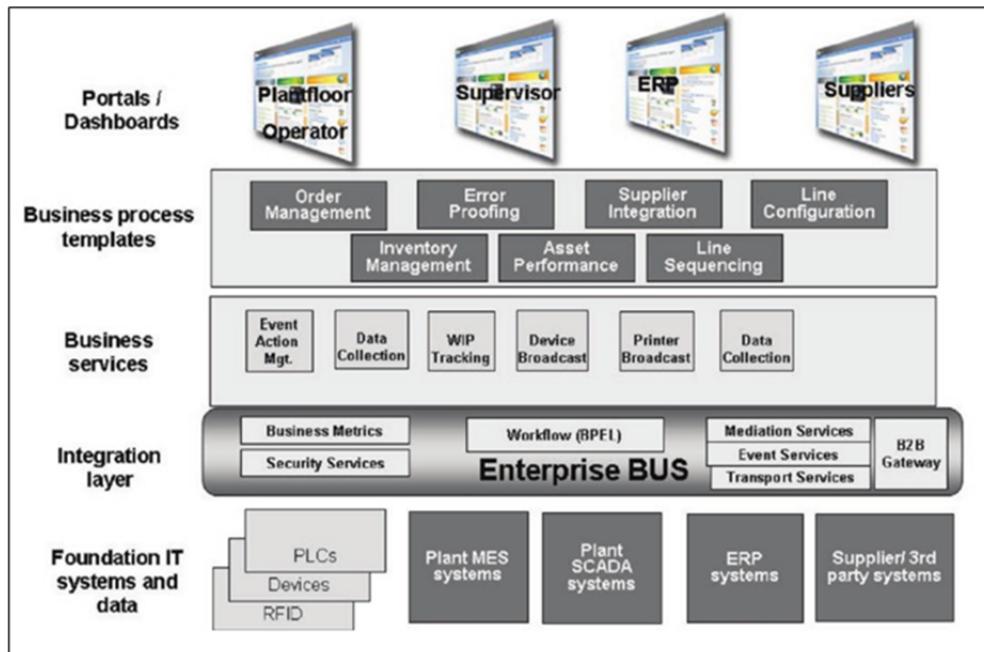


Figure 2.2 SOA pour une vision manufacturière

Tiré de MESA (2008)

D'autres architectures très présentes dans la littérature sont les architectures à base d'agent. Ce type d'architecture met les ressources au centre des activités de production. Ainsi, un agent peut aussi bien être une ressource unique (équipement, personnel, matière) qu'un ensemble de ressources (cellule de production, atelier, ligne de production). Les agents peuvent être hiérarchiques (agent maître-esclave) ou hétérogènes (agent pair-à-pair). Finalement, un agent est autonome et la coopération entre agents se fait par négociation. Parmi les approches basées sur les agents, il y a l'approche des systèmes multiagent (MAS), l'approche holonique (*holonic manufacturing system (HMS)*) (Cheng, Chang et Wu, 2004) et l'approche d'agents ontologiques (Georgoudakis et al., 2006).

Quelques associations se sont formées pour promouvoir les différentes approches basées sur les agents. Parmi ces associations, se trouve le projet PABADIS qui vise à construire des MES avec une collection d'agents de production autonomes qui devront coopérer pour assurer la bonne exécution des ordres de fabrication (Diep, Massotte et Meimouni, 2003), le consortium NIIIP-SMART qui travaille au développement d'une infrastructure d'information

permettant l'intégration et l'interopérabilité entre les MES et les systèmes d'information d'intra ou extra entreprise (Barry et al., 1998) et la FIPA (*the Foundation for Intelligent Physical Agent*) qui a pour but principal de spécifier comment des architectures à base d'agent de types différents peuvent fonctionner ensemble (Shen et al., 2006).

Bien que les architectures à base d'agent soient étudiées depuis longtemps par la communauté scientifique et que les communautés manufacturières y portent une grande attention, les applications industrielles qui utilisent cette technologie sont plutôt rares. Jammes et al. (2005) soulignent qu'en plus de l'absence de normes largement acceptées, l'une des raisons de cette situation semble être que les implémentations ne couvrent qu'une partie du paysage manufacturier, tandis que d'autres secteurs demeurent soumis à des normes, des méthodes et des mécanismes propriétaires, résultant en une mosaïque rigide de technologies isolées avec une extensibilité réduite. Shen et al. (2006) affirment que cette situation pourrait changer puisque la FIPA a rejoint la IEEE (*Institute of Electrical and Electronics Engineers*) computer Society comme un de ses comités des normes et que la spécification FIPA deviendra une norme IEEE.

2.4 Problèmes d'intégration

Relativement à d'autres systèmes d'information comme les ERP, l'adoption des MES dans les entreprises manufacturières demeure faible. Ceci est causé par plusieurs défis relativement à l'intégration, tel que démontré par plusieurs auteurs. De Ugarte, Artiba et Pellerin (2009) soulignent que durant les 25 dernières années, les spécialistes en système d'information n'ont pas tenu compte du secteur de l'atelier et que dans ce contexte, il n'est pas surprenant de constater que les départements de production ont toujours favorisé le développement de solutions personnalisées pour rencontrer les besoins spécifiques de support aux opérations industrielles. Ils concluent que toutes les entreprises manufacturières ont une solution d'intégration, mais que dans la plupart des cas elles sont à base de papier ou de personne.

Howells (2000) a identifié que la réalité des entreprises manufacturières est, entre autres choses, basée sur les faits suivants :

- Quels que soient les produits fabriqués, un progiciel financier peut être mis en œuvre dans n'importe quelle industrie;
- Quels que soient les produits fabriqués, la plupart des exigences logistiques sont similaires;
- C'est dans l'usine que les différences d'une entreprise à l'autre s'observent et c'est aussi dans l'usine que l'on trouve les données d'affaires.

Il n'est donc pas surprenant que les MES soient en retard sur les autres systèmes d'information. La complexité de l'atelier et la diversité des processus et des équipements placent les systèmes manufacturiers dans une position difficile. Cette diversité des besoins au niveau de l'usine signifie qu'en plus de devoir choisir parmi plusieurs types de MES, les logiciels sélectionnés doivent être configurés pour correspondre au modèle de l'usine et aux règles de gestion (MESA, 1997). Diep, Massotte et Meimouni (2003) expliquent que les difficultés d'intégration des MES sont causées par les méthodes d'optimisation des MES qui sont basées sur un modèle d'usine fixe et rigide, par une complexité de la production en constante augmentation en réponse à la concurrence et aux exigences des clients et par les technologies de réseau qui sont en constante évolution et qui génèrent des défis importants pour les entreprises qui veulent demeurer concurrentes face à la mondialisation.

Aujourd'hui, avec le besoin de toujours augmenter la productivité et la flexibilité de l'atelier, plusieurs MES répondent aux besoins d'intégration entre les systèmes de haut niveau et les systèmes de contrôle. Cependant, Fei (2010) mentionne que leur conception est basée sur une application prédéfinie pour une demande spécifique, ce qui fait que la polyvalence, l'intégration et l'agilité ne sont pas satisfaisantes. Li, Chen et Chen (2009) ajoutent qu'en plus de manquer de capacité d'adaptation, de réorganisation et de configuration, les MES sont incapables d'ajuster leurs fonctionnalités et leur architecture suivant les changements des entreprises, ce qui entrave l'adoption à grande échelle des MES.

2.5 Démarche vers l'intégration

Depuis l'arrivée des MES, des méthodes, des normes et des guides ont été publiés dans le but de favoriser l'utilisation des MES dans les entreprises manufacturières. Ces ouvrages permettent de comprendre les problèmes reliés à ce type de système, de définir des stratégies d'intégration et d'identifier de nouvelles idées pour l'utilisation et l'intégration des MES.

Un des premiers groupes à travailler spécifiquement sur l'adoption des MES est le consortium commandité par le gouvernement américain pour une solution de MES adaptatif à technologie reproductive – en l'anglais, *Solutions for MES-Adaptable Replicable Technology* (NIIIP/SMART). Ce consortium, dans lequel MESA International participe, a identifié quatre principales caractéristiques d'entreprises qui commandent la mise en œuvre des MES. Ces caractéristiques sont des dépenses en immobilisation faible, la disposition à un haut degré de changement, un court temps de cycle et la flexibilité des fonctionnalités (MESA, 1997). Globalement, le but de NIIIP/SMART est de réduire les coûts de développement des MES, de réduire ses coûts d'acquisition, d'augmenter son utilisation, d'augmenter la réutilisation de ses composants, de permettre l'interopérabilité et de permettre l'utilisation de technologies de fabrication de pointe (Barry et al., 1998).

C'est au tournant des années 2000 que l'*International Society of Automation* (ISA) a publié la norme ISA-95 sur le sujet de l'intégration des systèmes de contrôle d'entreprise. La norme propose plusieurs volets, dont une terminologie spécifique au domaine des opérations manufacturières (ISA-95, 2000) et des modèles d'activité pour la gestion des opérations manufacturières – en anglais *Manufacturing Operation Management* (MOM) - (ISA-95, 2005). De plus, la norme propose le langage B2MML (*Business to Manufacturing Markup Language*) qui permet d'échanger concrètement de l'information avec les autres systèmes de l'entreprise (Brandl, 2002; ISA-95, 2007). Scholten (2007) a publié un guide sur l'application de la norme qui, en plus de présenter et d'expliquer les modèles présentés dans la partie un et deux de la norme, décrit une méthode permettant d'expliciter les exigences de l'entreprise. Ce document permet de faire l'implantation d'un MES aligné adéquatement

avec les autres systèmes d'information, facilitant ainsi l'intégration entre ces systèmes. Cottyn et al. (2011) mentionnent qu'en établissant une cartographie des systèmes manufacturiers et des outils déjà en place, qu'en vérifiant les besoins d'intégration et qu'en considérant les différents flux d'information entre les différents systèmes, ISA-95 peut être la feuille de route pour une analyse bien structurée permettant de construire un plan de la situation à venir.

2.6 Sélection de MES

Dans un de ses documents de présentation technique (MESA, 1997), l'association MESA explique la démarche que fait généralement une entreprise qui veut faire l'acquisition d'un MES. Elle mentionne que compte tenu de la variation dans l'offre de produits, acheter un MES requiert préparation et précaution et souvent l'assistance de consultants ou d'intégrateurs de systèmes. Il incombera donc aux acheteurs d'identifier les fournisseurs qui ont de l'expérience non seulement dans leur industrie, mais aussi de l'expérience en programmation pour des installations ayant un modèle d'opération similaire. Les acheteurs pourront aussi rechercher les vendeurs offrant certaines fonctions qui sont importantes pour la compétitivité dans leur région spécifique.

Afin de définir les MES dans le contexte d'une entreprise en particulier, le fabricant doit identifier comment les activités principales sont affectées par l'exécution de la fabrication dans l'usine. Bien que les fonctions centrales des MES soient relativement constantes, la configuration et la priorité peuvent varier largement (MESA, 1997).

Traditionnellement, ce sont des critères financiers tels le retour sur l'investissement, la valeur présente et le taux de rendement interne qui sont utilisés pour l'aide à la décision. Selon Liang et Li (2006) ces méthodes ont deux limitations. Premièrement, elles considèrent seulement les effets tangibles ou monétaires en oubliant les effets intangibles. Deuxièmement, le processus de calcul est relativement complexe et complété par des professionnels de la finance, ce qui empêche les décideurs exécutifs de participer à

l'évaluation. Pour pallier ces limitations, Liang et Li (2006) présentent un modèle d'aide à la décision basé sur la méthode ANP (*analytic network process*). Dans les systèmes évalués, le système tel quel est comparé à 3 autres systèmes à venir. En ajoutant dans la sélection le système tel quel, la méthode permet d'évaluer les différentes solutions sélectionnées à l'actuel.

2.7 Amélioration continue

Plusieurs auteurs se sont penchés sur différentes pistes d'amélioration continue du point de vue des TI. Une étude de Hicks, Culley et McMahon (2006) a identifié des problèmes fondamentaux représentant les obstacles à l'amélioration et à la gestion de l'information rencontrées par les petites et moyennes entreprises. Une autre étude (Hicks, 2007), utilise ces problèmes fondamentaux pour caractériser la nature du gaspillage à l'égard de la gestion de l'information et des infrastructures des TI. Selon cette étude, ces causes de gaspillages sont de quatre types : l'échec de la demande, la circulation de la demande, l'excès de circulation et la circulation imparfaite.

Hicks (2007) approfondit l'analyse en établissant un lien entre ces types de gaspillage et quatre des sept types de gaspillage du modèle traditionnel de fabrication à valeur ajoutée. Selon lui, les quatre types de gaspillages correspondent respectivement à la production excessive, l'attente, les tâches inutiles et la production défectueuse. En contrepartie, les mouvements inutiles, les stocks et le transport n'ont pas trouvé de comparaison aussi forte dans le contexte de la gestion de l'information. Bien que l'échange de données à l'intérieur d'un système, le transfert de données vers d'autres systèmes et le stockage de l'information soient comparables, leurs coûts associés sont souvent négligeables en comparaison du coût dans un contexte de fabrication. Le tableau 2.1 présente les sept types de gaspillages traditionnels avec la définition associée aux systèmes d'information.

Par ailleurs, Cottyn, Stockman et Van Landeghem (2008) font remarquer que les objets normalisés, les attributs et les modèles d'information de la norme ISA-95 minimisent quelques-uns des sept types de gaspillages. Ils mentionnent, par exemple, que le transport et

les stocks devraient être minimisés parce que tous les systèmes ont le même modèle de données sous-jacent.

Tableau 2.1 Types de gaspillage adaptés au SI
Adapté de Cottyn, Stockman et Van Landeghem (2008)

Gaspillage	Définition adaptée au SI
Surproduction	Rapports ou informations inutilisées ou non nécessaires
Attentes	Attente de l'information pour supporter des décisions, ou information incomplète
Transport	Déplacement de l'information d'un système à un autre parce que les systèmes sont incompatibles
Tâches inutiles	Saisie de données et entretien en double
Stocks	Conservation de l'information inutile
Mouvements inutiles	Données fournies dans un mauvais format ou à un mauvais moment
Défaut	Données incorrectes ou vérification due à des changements

Un autre élément, pouvant être utilisé pour l'amélioration continue d'un point de vue des TI, est la cartographie de chaîne de valeur ajoutée – de l'anglais *value stream mapping* (VSM). Cette technique consiste à cartographier les opérations qui ajoutent de la valeur dans le but d'éliminer les opérations qui n'en ajoutent pas. Hicks (2007) s'intéresse à la technique de cartographie de chaîne de valeur ajoutée dans un contexte de système d'information. Selon lui, lorsque l'information est considérée, il est particulièrement difficile de définir le continuum de la «valeur» puisque la proposition de valeur consiste à savoir si l'information appuie les prises de décision, la familiarisation ou le contexte général. Elle consiste, en plus, à savoir si cette information offre une valeur actuelle ou une valeur potentielle. L'application de cette philosophie à valeur ajoutée aux TI est appelée gestion de l'information à valeur ajoutée.

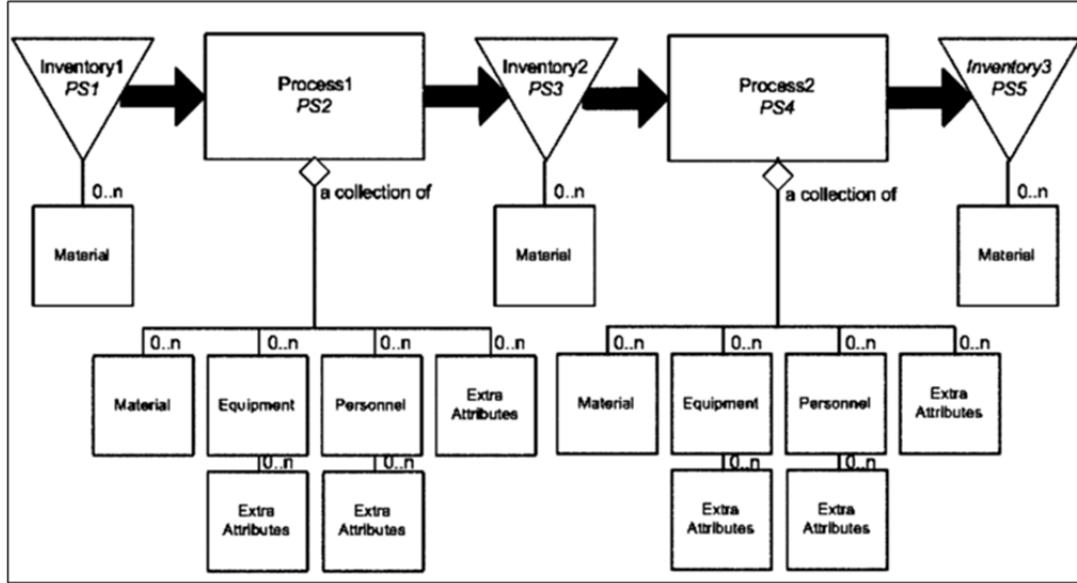


Figure 2.3 Cartographie de chaîne de valeur ajoutée avec la terminologie ISA-95

Tiré de Cottyn et al. (2009)

Selon Cottyn, Stockman et Van Landeghem (2008), une maquette expérimentale doit être mise en place pour tester la compatibilité de la philosophie à valeur ajoutée des MES existants. Selon eux, plusieurs éditeurs affirment que leurs logiciels supportent les pratiques à valeur ajoutée sans toutefois parvenir à valider cette théorie à fond. Ils concluent qu'en mettant le logiciel à l'épreuve dans un environnement simulé, le niveau de valeur ajoutée du logiciel pourrait être évalué et que les résultats de ces tests pourraient mettre en évidence des faits importants à considérer pour le cadriel de MES à valeur ajoutée.

Finalement, les processus MOM – de la norme ISA-95 – peuvent déclencher, alimenter ou valider le processus de prise de décision à valeur ajoutée en fournissant de l'information utile. En outre, MOM peut maintenir l'amélioration du processus en appliquant une façon normalisée de travailler. D'autre part, les processus MOM doivent être inclus dans le cycle d'amélioration continue pour éviter qu'ils ne deviennent désuets (Cottyn et al., 2011). Cottyn et al. (2011) proposent une méthode pour analyser l'alignement entre la philosophie de valeur ajoutée et les MES basée sur le cadre de gestion des opérations de production fourni par ISA-95.

2.8 Modélisation de processus MES

La modélisation des processus MES est un sujet encore peu étudié. On retrouve beaucoup d'articles de littérature sur les MES et beaucoup d'autres sur la modélisation, mais très peu sur la combinaison des deux. Par exemple Zor, Görlach et Leymann (2010) proposent une approche pour automatiser l'exécution du VSM en utilisant le BPMN 2.0 pour illustrer certains éléments de notation du VSM. Cottyn (2012) utilise le VSM en collaboration avec la norme ISA-95 pour faire la conception d'une plateforme « lean MES ».

Le travail de recherche de He, Lobov et Martinez Lastra (2012), présente un outil qui permet de créer les spécifications de produit pour une entreprise en se basant sur le modèle ISA-95. L'outil permet de saisir l'information dans les multiples tables des 9 modèles de la norme. Selon Witsch et Vogel-Heuser (2012), pour exploiter adéquatement les avantages du MES il importe que, dans la première phase d'un projet MES, les données disponibles et requises soient identifiées et que les fonctionnalités à couvrir par le nouveau système, en comparaison du système en place, doivent être explicité adéquatement. Dans ce contexte, Witsch et Vogel-Heuser (2012) expliquent que la qualité et la fiabilité d'un langage de modélisation passent par une syntaxe et une sémantique formels et consistantes. Le modèle proposé par les auteurs repose sur le BPMN, duquel ils ont adapté la sémantique au contexte particulier du MES.

2.9 Évaluation des notations

L'évaluation des notations permet, bien sûr, de faire l'évaluation, mais surtout de comparer et d'améliorer des notations existantes et de créer de nouvelles notations. Différentes méthodes existent pour faire cette évaluation. L'une de ces méthodes est l'analyse ontologique qui permet de faire l'évaluation systématique des concepts utilisés dans un langage de modélisation. Rosemann, Green et Indulska (2004) présentent une méthodologie de référence pour mener une analyse ontologique. Plus particulièrement, Recker et al. (2005) font une analyse ontologique sur la modélisation BPMN.

Dans un autre ordre d'idée, Moody (2009) propose une méthode pour faire la conception de notations cognitivement efficace. Cette efficacité cognitive se caractérise par la rapidité, la facilité et la précision à laquelle une représentation peut être traitée par le cerveau humain. Selon Moody (2009), l'analyse ontologique fournit une manière d'évaluer la sémantique d'une notation en excluant spécifiquement les aspects de la représentation visuelle. L'accent est sur le contenu plutôt que sur la forme. La méthode d'efficacité cognitive utilise les connaissances sur le fonctionnement du cerveau pour construire une notation intuitive. Par exemple, Moody (2009) explique que le traitement est divisé en deux phases par le cerveau : Le traitement perceptif (voir), qui est automatique, très rapide et exécuté en parallèle et le traitement cognitif (comprendre), qui opère sous contrôle de l'attention, est relativement lent, exige de l'effort et est séquentiel. Le meilleur exemple de variable visuelle cognitivement effective est la couleur qui se distingue trois fois plus rapidement que les formes (Hommes et van Reijswoud, 2000).

Les deux méthodes ont un intérêt dans l'évaluation d'une nouvelle notation. L'analyse ontologique permet de faire une évaluation systématique des concepts clés couverts par les éléments de notation dans un domaine donné alors que la méthode de conception de notations cognitivement efficace permet d'évaluer l'efficacité avec laquelle les éléments de notations seront interprétés par le cerveau.

2.10 Synthèse

Le tableau 2.2 présente une synthèse des sujets importants de la littérature sur les MES. Bien que les MES aient pris une place importante dans les entreprises manufacturières, il reste encore beaucoup de place pour l'innovation. Une innovation qui permettra aux MES de prendre une place beaucoup plus importante dans une industrie de plus en plus compétitive. Avec des associations comme le MESA et des normes comme ISA-95, autant l'entreprise privée que la recherche s'assurent de travailler de façon concertée pour innover dans le domaine des MES. Il est maintenant reconnu par les spécialistes – basé sur des études objectives – que les MES fournissent des outils bénéfiques pour les entreprises qui les

utilisent. Cependant, il reste encore à convaincre les décideurs que les avantages dépassent largement les inconvénients. Alors que les ateliers d'aujourd'hui ont besoin d'être flexibles et à l'écoute de leurs clients, les systèmes informatiques intégrés ont parfois une mauvaise réputation de lourdeur et de résistance aux changements.

Une meilleure compréhension de l'état actuel de l'atelier, l'aide des technologies de pointe et des idées innovantes peuvent contribuer à favoriser l'adoption des MES. D'ailleurs, des techniques utilisées depuis longtemps dans la gestion de la fabrication, tel le six-sigma et la production à valeur ajoutée, commencent à intéresser les spécialistes en système d'exécution de la fabrication. Ces philosophies intégrées aux MES apportent un point vu différent et offrent de nouvelles perspectives d'utilisation de ces systèmes.

Il serait intéressant de développer un modèle basé sur la notation BPMN – déjà largement accepté par la communauté scientifique et industrielle pour la modélisation de processus d'affaires – qui intégrerait la terminologie et les modèles d'activités MOM de la norme ISA-95. Le modèle proposé permettrait de définir les spécifications du MES à partir du processus d'affaires, de sélectionner un système répondant aux besoins spécifiques de l'entreprise et de déployer le MES en harmonie avec le modèle ISA-95 facilitant ainsi l'intégration avec les autres systèmes de l'entreprise.

Finalement, l'apport d'un modèle de notation basé sur le BPMN et la norme ISA-95 qui permettrait à des intervenants de toutes disciplines de communiquer clairement les besoins de l'entreprise en accord avec les processus d'affaires apporterait aux MES un atout de plus pour augmenter son utilisation et son intégration dans les entreprises.

Tableau 2.2 Synthèse des sujets de la revue de littérature

Domaines	Éléments du domaine	Publications
Utilisation	Intégration	(De Ugarte, Artiba et Pellerin, 2009; Diep, Massotte et Meimouni, 2003; Fei, 2010; Howells, 2000; Li, Chen et Chen, 2009; MESA, 1997)
	Amélioration continue	(Brandl, 2002; Channabasavaiah, Holley et Tuggle, 2004; Hicks, Culley et McMahon, 2006; Recker et al., 2005)
Architecture	Orienté Service (SOA)	(Channabasavaiah, Holley et Tuggle, 2004; MESA, 2008)
	Basé sur des agents	(Barry et al., 1998; Cheng, Chang et Wu, 2004; Diep, Massotte et Meimouni, 2003; Georgoudakis et al., 2006; Shen et al., 2006)
Notation de Modélisation	BPMN	(OMG, 2011; Witsch et Vogel-Heuser, 2012; Zor, Görlach et Leymann, 2010)
	VSM	(Cottyn, 2012; Zor, Görlach et Leymann, 2010)
Évaluation des notations	Analyse ontologique	(Recker et al., 2005; Rosemann, Green et Indulska, 2004)
	Analyse cognitivement efficace	(Hommes et van Reijswould, 2000; Moody, 2009)
Groupe de travail et normalisation	ISA-95	(Brandl, 2002; ISA-95, 2000; 2005; 2007; Scholten, 2007)
	PABADIS NIIIP/SMART	(Barry et al., 1998; Diep, Massotte et Meimouni, 2003; MESA, 1997; Shen et al., 2006)
	MESA	(MESA, 1997; 2008; 2011; 2012)

CHAPITRE 3

MÉTHODOLOGIE

3.1 Introduction

L'objectif de ce mémoire est de proposer un modèle conceptuel pour faire l'analyse systématique des processus d'affaires d'une entreprise manufacturière en accord avec le modèle d'intégration de la norme ISA-95 et en utilisant la notation BPMN pour en faire la modélisation. Cette façon de faire a l'avantage, d'une part, que toute l'information nécessaire pour décrire les processus à prendre en charge par un MES soit contenue dans les modèles de hiérarchie des fonctions et de hiérarchie des équipements ainsi que dans les neuf modèles objet d'ISA-95. D'autre part, le BPMN est une notation accessible à des intervenants de disciplines différentes et est une notation déjà largement utilisée dans l'industrie. L'innovation de ce mémoire repose sur le modèle conceptuel présenté dans ce chapitre qui crée une correspondance entre les modèles publiés par ISA-95 et les éléments de notation BPMN et propose une méthode pour mesurer la conformité entre l'analyse des processus d'affaires et la mise en œuvre du MES.

Parmi les alternatives qui ont pour but de répondre au besoin de faire la collecte structurée des requis nécessaires à l'implantation d'un MES, il y a l'utilisation d'outils propriétaires spécialement conçus pour fonctionner avec un MES bien spécifique. Ces outils ont pour avantages de supporter une transition parfaitement intégrée entre le modèle développé et le MES. Cependant, l'utilisation de ces outils est limitée à l'utilisation avec le MES pour lequel ils ont été développés. Une autre alternative est l'utilisation de la norme ISA-95 utilisée seule pour expliciter les exigences de façons structurée avec un lexique spécifique au domaine des MES.

Tout au long de ce chapitre, il sera question de processus. Dans certains cas, il sera question de processus d'affaires pour lequel on trouve plusieurs définitions dans la littérature. Dans ce mémoire, c'est la définition de Hammer et Champy (1993) qui est utilisée. Hammer et

Champy définissent le processus d'affaires comme « une suite d'activités, qui à partir d'une ou plusieurs entrées (input) produit un résultat (output) représentant une valeur pour un client ». Dans d'autres cas, le processus en question sera le processus métier élémentaire (PMÉ) qui est défini par Larman (2001) comme « une tâche accomplie par une personne, dans un endroit, à un instant donné, en réponse à un événement, qui ajoute une valeur commerciale mesurable et laisse les données dans un état cohérent ». Lorsque le terme processus est utilisé seul, il désigne les deux types de processus.

Dans les prochaines sections de ce chapitre, les liens entre les éléments de notation BPMN et trois des concepts clés de la norme ISA-95 – soit la hiérarchie des fonctions, la hiérarchie des équipements ainsi que les modèles objets – seront expliqués en détail. Par la suite, ces liens seront utilisés pour proposer une démarche visant à faire l'identification et la modélisation des processus d'affaires à prendre en charge par un MES. Enfin, la dernière section expliquera comment il est possible d'utiliser ces liens pour faire la validation d'un projet d'intégration d'un MES.

3.2 BPMN et la hiérarchie des fonctions

La figure 3.1 illustre comment il est possible de relier directement les différents niveaux de la hiérarchie des fonctions de l'entreprise (tel que développé en détail à l'ANNEXE I) aux trois sous-classes de BPMN. En effet, la représentation d'ISA-95 sur trois principaux niveaux s'accorde bien avec les concepts de sous-classe de la norme BPMN. De ce fait, on peut créer des liens qui serviront de balise sur l'utilisation du niveau de détails à utiliser dans chacune des sous-classes :

- Le niveau de planification opérationnelle et logistique (niveau 4) est modélisé par la sous-classe **descriptive**. Ce niveau correspond aux processus d'affaires généralement utilisés dans les systèmes d'entreprise comme les ERP.

- Le niveau de gestion des opérations manufacturières (niveau 3) est modélisé par la sous-classe **analytique**. Ce niveau correspond aux processus métiers élémentaires qui sont supportés par les MES.
- Les niveaux de contrôle (niveau 2, 1 et 0) sont modélisés par la sous-classe **d'exécutable commun**. Ces niveaux correspondent aux opérations de contrôle et d'automation des différents équipements utilisés ainsi qu'aux opérations manuelles.

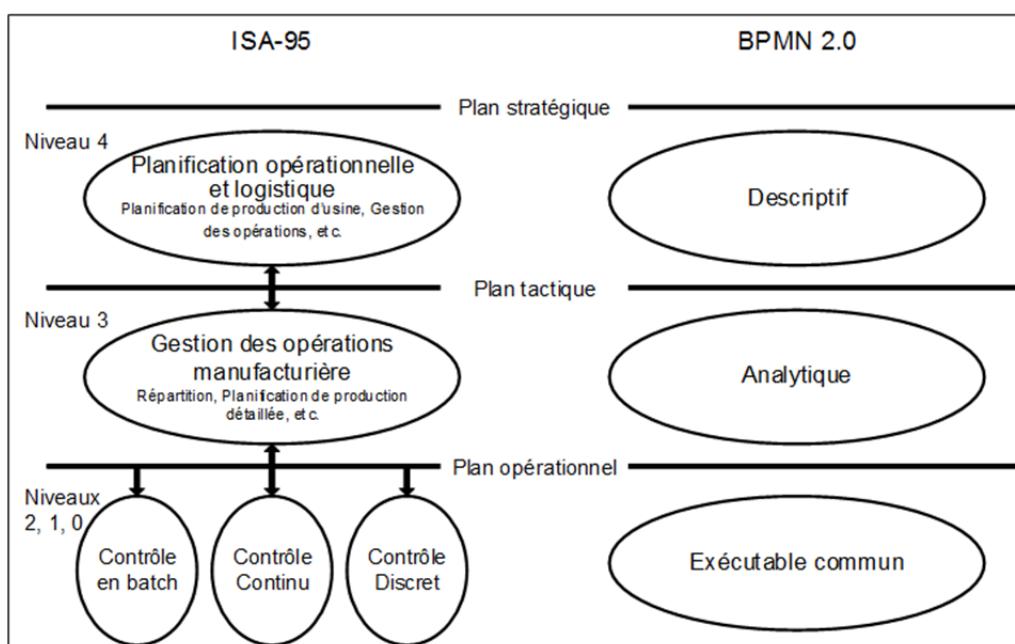


Figure 3.1 Correspondance entre hiérarchie des fonctions et sous-classes BPMN.

3.3 BPMN et la hiérarchie des équipements

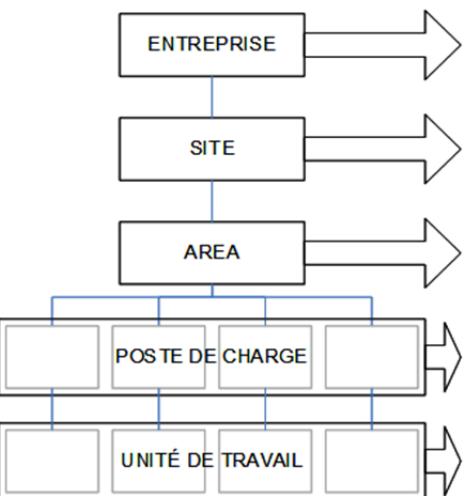
La correspondance entre les éléments BPMN (tel que développé à l'ANNEXE II) et les éléments de la hiérarchie des équipements varie en fonction de la sous-classe (tableau 3.1). Par exemple, le sous-modèle de collaboration au niveau de l'équipement « entreprise » se situe dans la sous-classe descriptive alors qu'il se situe dans la sous-classe analytique pour l'équipement « site ».

Il est intéressant de noter que les éléments BPMN suivent toujours le même ordre pour les trois sous-classes. De haut en bas, il y a le sous-modèle de collaboration, les couloirs de type *pool* et *Lane* et finalement un des trois types d'activité tels que définis par la norme BPMN. Chacun de ces types d'activité est associé à une sous-classe.

- Sous-processus : Utilisé dans la sous-classe descriptive et situé au niveau du poste de charge.
- Activité : Utilisée dans la sous-classe analytique et située au niveau de l'unité de travail.
- Tâche : Utilisée dans la sous-classe d'exécutable commun et située sous l'unité de travail.

Tableau 3.1 Corrélation entre BMPN 2.0 et la hiérarchie des équipements

ISA-95	Sous-classe BPMN		
Hiérarchie des équipements	Descriptif (Niveau 4)	Analytique (Niveau 3)	Exécutable (Niveau 2, 1 et 0)
ENTREPRISE	Collaboration		
SITE	Pool	Collaboration	
AREA	Lane	Pool	Collaboration
POSTE DE CHARGE	Sous-processus (Processus d'affaires)	Lane	Pool
UNITÉ DE TRAVAIL		Activité (PMÉ)	Lane
			Tâche (Opération)



Cette correspondance entre les éléments de notation BPMN et la hiérarchie des équipements permet de bien définir le contexte d'utilisation des éléments BPMN qui seront utilisés lors de

la modélisation des processus. Puisque le niveau de détails des processus à modéliser varie en fonction de la sous-classe, les éléments de notation BPMN s'accordent naturellement avec le concept de hiérarchie des équipements. Par exemple, de la même façon qu'un site est composé d'un ou plusieurs *area* il est naturel qu'un *pool* modélisé dans la sous-classe analytique devienne une *lane* dans la sous-classe descriptive.

3.4 BPMN et les modèles objet

Les modèles objet d'ISA-95 peuvent être regroupés en quatre thèmes principaux. Ces thèmes sont la définition, la capacité, l'ordonnancement et la performance. En tout, six des neuf modèles objet de la norme sont représentés dans ces quatre thèmes et ont tous une correspondance directe avec les trois derniers modèles, soit l'équipement, le matériel et le personnel. Les interactions entre les modèles objet sont illustrées à la figure 3.2.

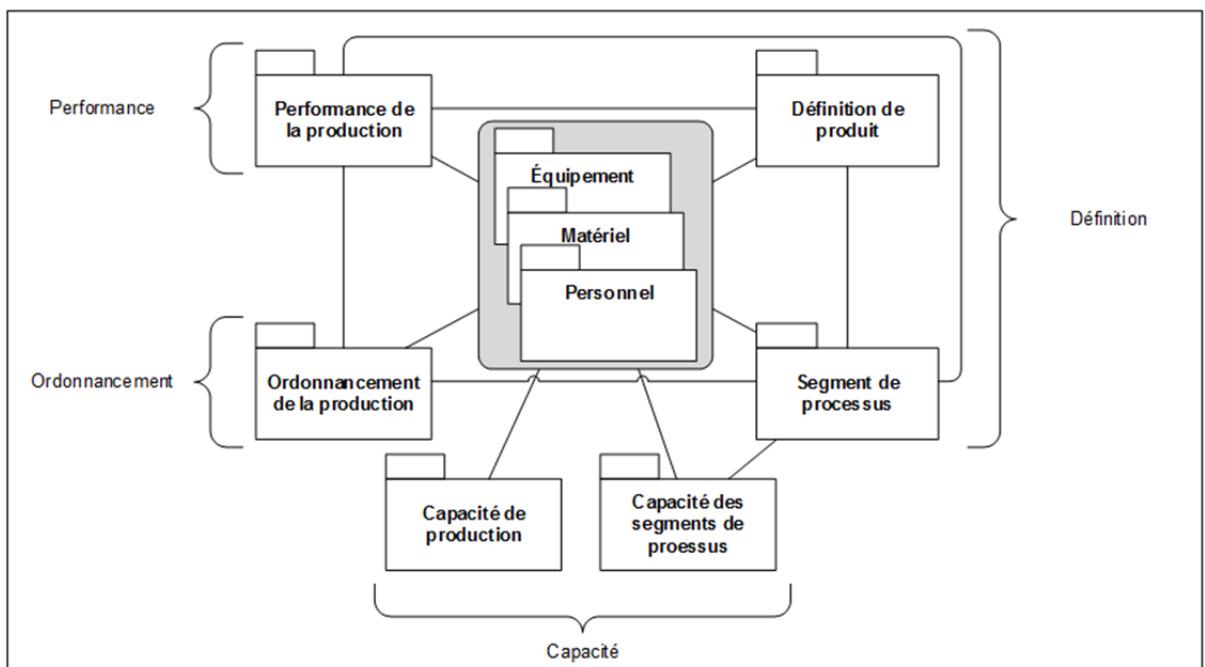


Figure 3.2 Interaction entre les modèles objet de la norme ISA-95

Il est possible de faire des liens entre les éléments des modèles objet contenus dans les thèmes de définition, de performance et d'ordonnancement et les éléments BPMN qui sont

utilisés pour la modélisation de processus. À titre d'exemple, prenons un site manufacturier avec un PMÉ de perçage. Ce PMÉ sera représenté par un objet différent en fonction du thème. De ce fait, la définition du PMÉ de perçage sera représenté par l'objet « *process segment* » alors que les produits le seront par l'objet « *product segment* ». Ensuite, le MES utilisera l'information contenue dans ces deux objets pour faire l'ordonnancement du PMÉ dans l'objet « *segment requirement* ». Finalement, lorsque le perçage sera exécuté, les informations relatives à sa performance seront contenues dans l'objet « *segment response* ».

Cependant, les éléments de base comme les événements, les couloirs, les activités et les objets de données, ne permettent pas de couvrir tous les éléments des modèles objet. Pour pallier ce manque, cinq extensions sont ajoutées aux éléments BPMN (le principe d'extensibilité BPMN est détaillé à l'ANNEXE II). Les deux premières extensions utilisées sont celles pour l'artefact « activité ». Elles permettent de supporter les paramètres de processus ainsi que de spécifier le personnel nécessaire à l'exécution du processus. L'extension suivante est celle de l'artefact « objet de données » de type matière qui permet de supporter les propriétés des matières entrantes. Finalement, les deux dernières extensions sont également sur l'artefact « objet de données », mais cette fois-ci pour celui de type produit. Tout comme pour les extensions de l'artefact « activité », elles permettent de supporter les paramètres et le personnel nécessaires à la réalisation du produit. Tous les liens, pour la sous-classe analytique, entre les éléments BPMN et les éléments des modèles objets sont représentés dans le tableau 3.2.

Mentionnons que selon la norme ISA-95, l'ordonnancement peut être fait soit sur les processus, soit sur les produits ou soit sur les deux. Dans le tableau 3.2, les objets précédés d'un astérisque sont disponibles seulement pour un système qui fait l'ordonnancement des processus. Le type d'ordonnancement privilégié dans cette méthode est l'ordonnancement par des produits.

Tableau 3.2 BPMN en relation avec les modèles objet ISA-95 (analytique)

BPMN	Élément du modèle objet		
Artéfact	Définition	Ordonnancement	Performance
	<i>Product production rules</i>	<i>Production request</i>	<i>Production response</i>
	<i>Product production rules : location</i>	<i>Location</i>	s.o
	<i>Process segment : location</i>	s.o	<i>Location</i>
	<i>Process segment</i>	<i>Segment requirement*</i>	<i>Segment response</i>
Extension d'activité de type « paramètre de processus »	<i>Process segment parameter</i>	<i>Production parameter*</i>	<i>Production data</i>
Extension d'activité de type « personnel »	<i>Personnel segment specification</i>	<i>Personnel requirement*</i>	<i>Personnel actual</i>
	<i>Material specification et material segment specification</i>	<i>Material consumed requirement</i>	<i>Material consumed actual</i>
Extension d'objet de données de type « spécification de matière »	<i>Material specification property et material segment specification property</i>	<i>Material consumed requirement property</i>	<i>Material consumed actual property</i>
	<i>Product segment</i>	* <i>Material produced requirement et Segment requirement</i>	<i>Material produced actual</i>
Extension d'objet de données de type « paramètre de segment de produit »	<i>Product Parameter</i>	* <i>Material produced requirement property et production parameter</i>	<i>Material produced actual property</i>
Extension d'objet de données de type « personnel »	<i>Personnel specification</i>	<i>Personnel requirement</i>	s.o.

Afin de bien présenter l'utilisation du concept d'extension, la figure 3.3 illustre la correspondance d'une activité utilisée avec une extension avec les objets des modèles de définition, d'ordonnancement et de performance.

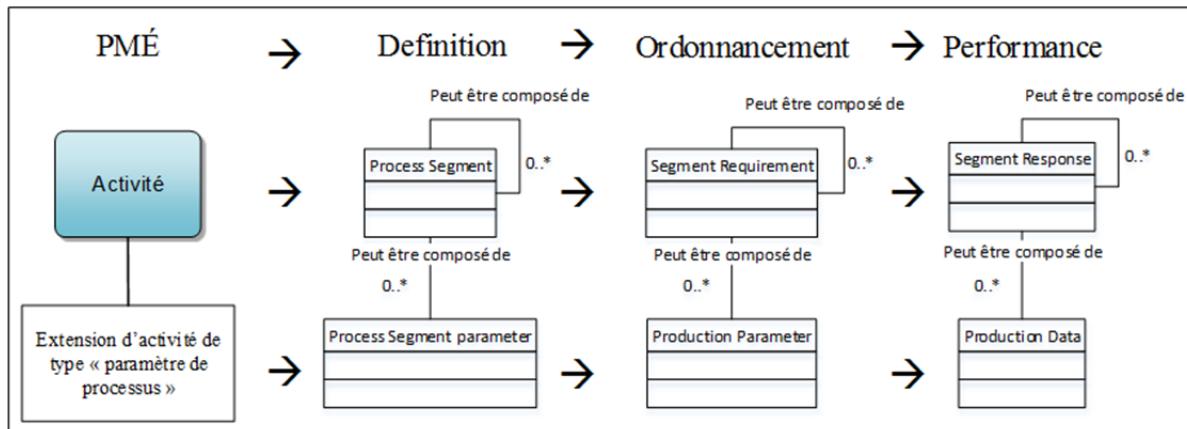


Figure 3.3 Utilisation d'une extension pour un PMÉ dans différents objets ISA-95

Bien que la plupart des liens entre les objets ISA-95 et les artefacts BPMN appartiennent à la sous-classe analytique, il y a quelques exceptions pour les sous-classes exécutable commun et descriptive. Tout d'abord, en accord avec les liens établis entre BPMN et la hiérarchie des équipements (section 3.3), l'artefact « Lane » se situe au niveau de l'unité de travail lorsque celui-ci est utilisé dans la sous-classe « exécutable commun ». Puisque l'unité de travail est le dernier élément de la hiérarchie des équipements, ce dernier est le plus petit élément d'équipement pouvant être ordonné dans le MES. Le tableau 3.3 indique les liens qu'a l'artefact « Lane » avec les modèles objet. Ensuite, les liens entre l'artefact « sous-processus », utilisé dans la sous-classe descriptive, et les modèles objet sont présentés dans le tableau 3.4.

Tableau 3.3 BPMN en relation avec les modèles objet ISA-95 (exécutable commun)

BPMN	Élément du modèle objet		
Artéfact	Définition	Ordonnancement	Performance
	<i>Equipment specification et Equipment segment specification</i>	<i>Equipment requirement</i>	<i>Equipment actual</i>

Tableau 3.4 BPMN en relation avec les modèles objet ISA-95 (descriptive)

BPMN	Élément du modèle objet		
Artéfact	Définition	Ordonnancement	Performance
	<i>Process segment</i>	<i>Segment requirement</i>	<i>Segment response</i>

Soulignons que les éléments « sous-processus » du tableau 3.4 et « activité » du tableau 3.2 sont représentés par le même élément de modèle objet, soit le « *process segment* ». Cette particularité est bien en phase avec cet objet, puisque conformément à sa définition, il peut être composé de lui-même. En clair, un segment de processus peut être composé d'autres segments de processus ou dans le cas précis de cette méthodologie, un processus d'affaires peut être composé de PMÉ. Ce concept est représenté par la figure 3.3.

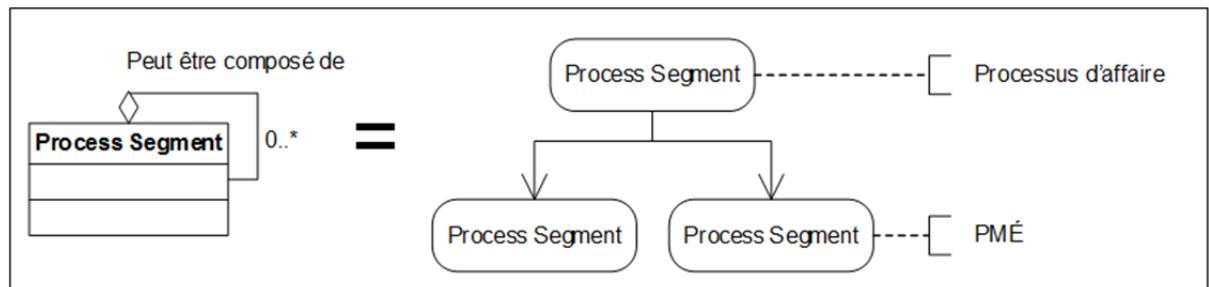


Figure 3.4 Illustration d'un segment de processus sur différents niveaux

La figure 3.5 illustre certaines des correspondances représentées dans le Tableau 3.2 pour le point de vue de la définition. Par exemple l'élément BPMN « activité » à une correspondance directe avec l'objet « *process segment* » d'ISA-95, alors que les objets « *process segment parameter* » et « *personnel segment specification* » ont une correspondance avec les extensions « paramètre de processus » et « personnel » de l'élément « activité ». Les deux modèles objet utilisés dans la figure ci-dessous sont le modèle objet de la définition de produit et le modèle objet de segment de processus.

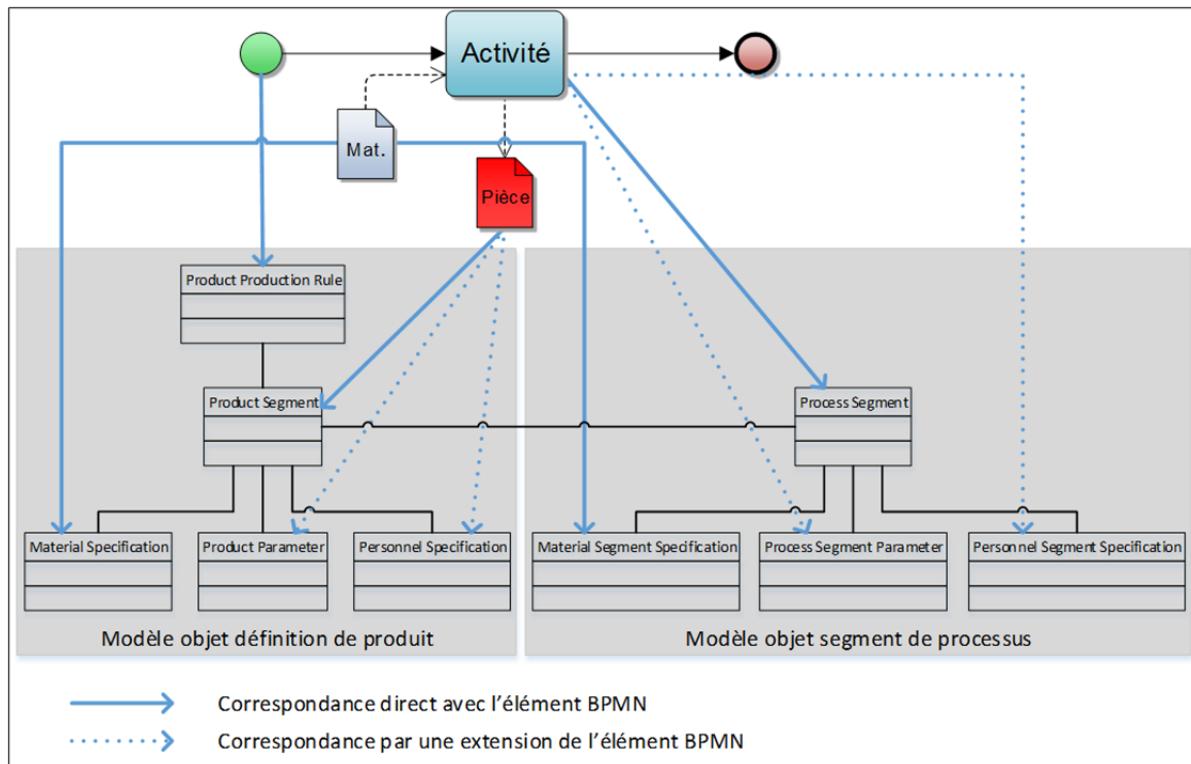


Figure 3.5 Illustration des correspondances entre les éléments BPMN et les objets ISA-95

3.5 Identification

Maintenant que les liens entre ISA-95 et BPMN sont bien établis, la démarche d'intégration peut s'amorcer. La phase initiale de cette démarche est l'identification des éléments à supporter par le MES. Pour ce faire, deux modèles d'ISA-95 sont mis à contribution : le

modèle d'activité générique de la gestion des opérations manufacturières (figure 3.6) et le modèle hiérarchique des équipements (figure 3.7).

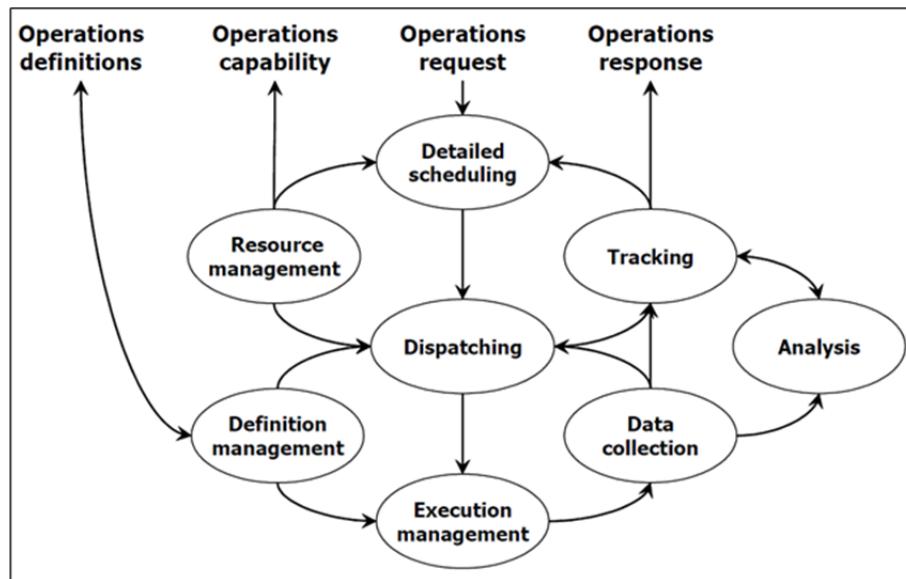


Figure 3.6 Modèle d'activité générique de la gestion des opérations manufacturières

Tiré d'ISA-95 (2005)

Tout d'abord, rappelons que le modèle d'activité générique de la gestion des opérations manufacturières définit huit activités qui font partie de la gestion des opérations. Ces activités sont l'ordonnancement détaillé, la gestion des ressources, la traçabilité, la répartition, l'analyse, la gestion des définitions, la gestion de l'exécution et la collecte des données. Ces concepts s'appliquent dans quatre grandes catégories de gestion des opérations : la production, l'entretien, la qualité et le stockage.

Faire l'inventaire des activités devant être supportées avec le MES dans chacune des grandes catégories permet de définir la portée du projet. Par exemple, l'entreprise pourrait décider d'intégrer les huit activités de gestion des opérations pour la catégorie production et seulement la gestion des ressources pour la catégorie entretien. En outre, ces informations seront aussi nécessaires lors de la sélection des modules (ou des licences) du MES.

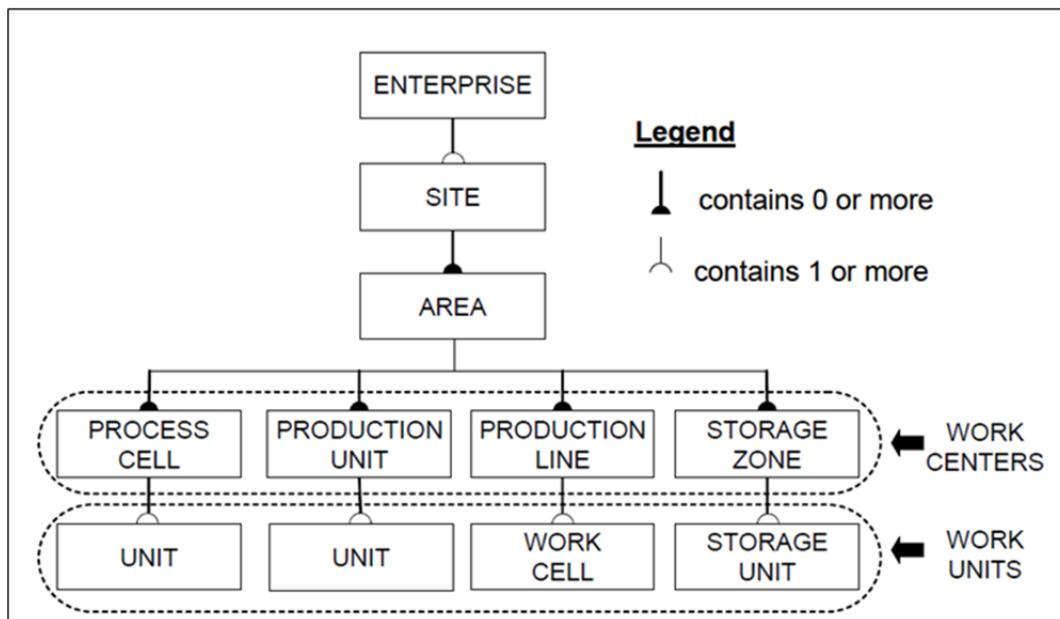


Figure 3.7 Modèle hiérarchique des équipements

Tiré d'ISA-95 (2005)

Pour sa part, le modèle hiérarchique des équipements (figure 3.7) définit les actifs physiques de l'entreprise. Cette dernière est divisée en sites et en *areas* représentant des groupes physiques où se déroulent différentes activités. Dans ces entités se trouvent des cellules de production, des unités de production, des lignes de production et des zones d'entreposage. Ce sont les postes de charge – en anglais *work centers*. Finalement, chaque poste de charge est composé d'unités de travail qui représentent la plus petite pièce d'équipement à définir dans le MES. L'identification des équipements selon le modèle hiérarchique a deux objectifs principaux :

- Établir une bonne image de la structure physique de l'entreprise qui sera prise en charge par le MES.
- Préparer l'étape de modélisation en fournissant l'information nécessaire aux liens définis dans le tableau de corrélation entre BMPN 2.0 et la hiérarchie des équipements (tableau 3.1).

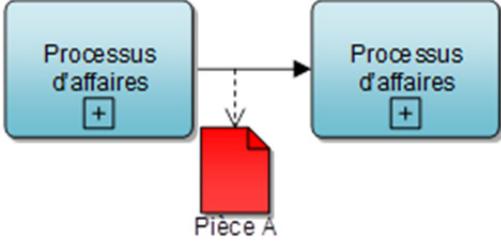
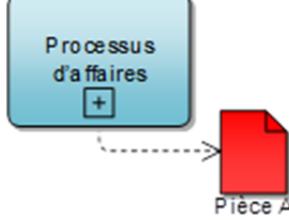
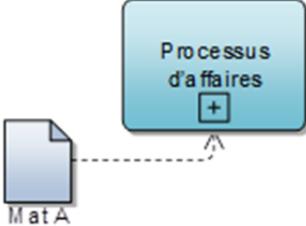
Le travail d'identification étant fait, il est maintenant possible de passer à la phase de modélisation des processus d'affaires et des PMÉ qui seront nécessaires pour assurer la mise en œuvre des fonctions de l'entreprise identifiées précédemment.

3.6 Modélisation

La phase de modélisation déterminera la capacité de production de l'entreprise en mettant en relation les différents actifs et processus. La mise en œuvre de cette phase s'effectue en trois étapes correspondant à chacune des sous-classes BPMN (figure 3.1). De plus, tel qu'illustré au tableau 3.1, les éléments BPMN représenteront une hiérarchie d'équipements différente en fonction de la sous-classe dans laquelle ils sont utilisés. Ainsi les artefacts BPMN de type activité s'associent de façon naturelle aux processus. Cependant, il n'y a pas d'éléments pour représenter les produits (finis et semi-finis), les matières et les ressources humaines de façon aussi naturelle.

Dans ce modèle conceptuel, c'est l'artefact « objet de données » de BPMN qui est désigné pour représenter les produits et les matières. Conformément à la définition de la norme BPMN, l'objet de données représente une donnée ou un ensemble de données, entrantes ou sortantes, à une activité ou un sous-processus. Cette définition s'accorde particulièrement bien avec le rôle qu'ont les matières entrantes et sortantes d'un processus ainsi qu'à celui d'un produit fini ou semi-fini. Notamment, cette approche a déjà été utilisée par Zor, Görlach et Leymann (2010) dans une démarche pour faire un lien entre le modèle VSM et BPMN. Le tableau 3.5, donne la signification de certains cas d'utilisation de l'objet de données.

Tableau 3.5 Utilisation de l'objet de données pour représenter la matière

Artéfact	Description
 Pièce B Mat A	Les matières sont représentées par l'objet de données. La couleur rouge est utilisée pour identifier un élément du modèle de définition de produit.
 Processus d'affaires Pièce A	Un élément sortant d'un élément de connexion représente un produit semi-fini. La propagation de ce produit semi-fini aux postes de charge en aval est implicite.
 Processus d'affaires Pièce A	Un élément sortant d'une activité représente un produit fini.
 Mat A	Un élément entrant d'une activité représente la matière entrante.

Ne restent donc que les ressources humaines du modèle objet « personnel » à symboliser. Cette dernière ressource n'a pas de représentation graphique comme les processus, les matières, les produits et les équipements. C'est donc dans une extension des artéfacts « activités » et « objets de données » que cette ressource est supportée, tel qu'utilisé dans le tableau 3.2 qui met en relation les artéfacts BPMN avec les modèles objet ISA-95.

Afin d'apporter plus d'information à l'activité de type « paramètre de processus », cette dernière peut être séparée en trois catégories correspondant aux thèmes de définition,

d'ordonnancement et de performance. Puisque la couleur est une variable visuelle qui se distingue plus rapidement que les formes, l'utilisation de la couleur dans la modélisation permet de rendre plus efficace la distinction de la relation avec les modèles objets ISA-95 de certains éléments de notation. Ainsi, les couleurs associées à chaque thème peuvent être utilisées avec l'artefact « activité » et ainsi ajouter de l'information supplémentaire sur la nature des spécifications qu'il contient. Il y a quatre couleurs pour les quatre modèles objet utilisés dans la validation (figure 3.8).

- Définition de produit : rouge
- Segment de processus : bleu
- Ordonnancement de la production : jaune
- Performance de la production : vert

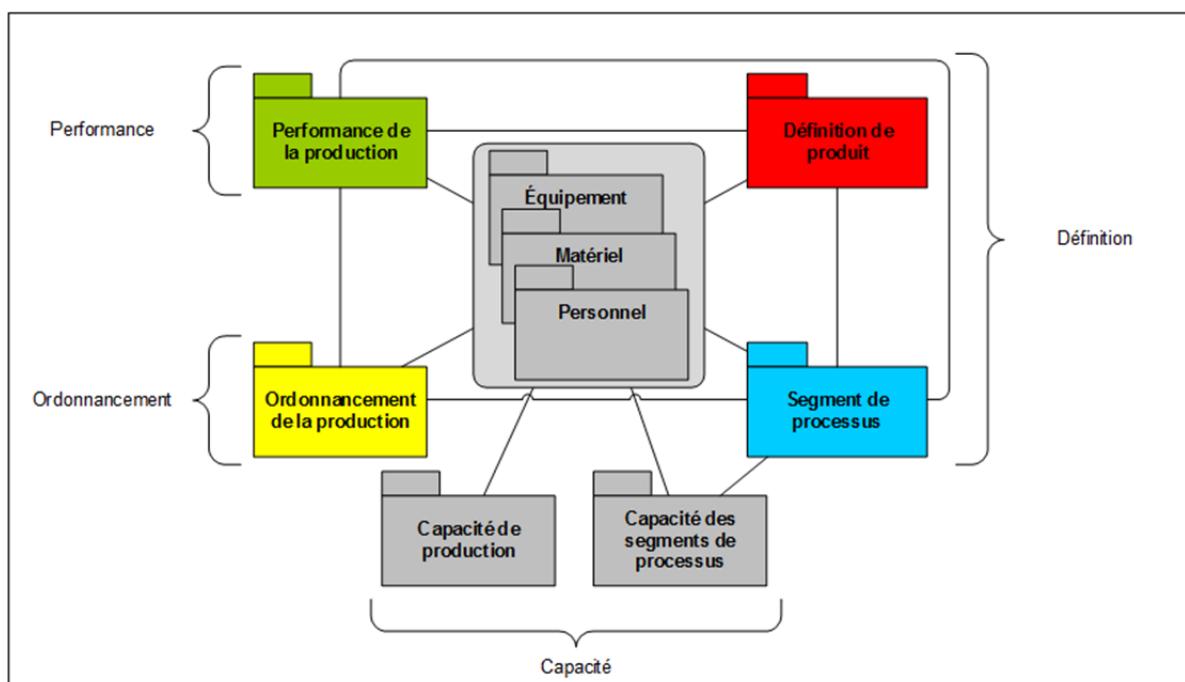


Figure 3.8 Interaction entre les modèles objets de la norme ISA-95 en couleur

Notons que l'utilisation de cette variable visuelle n'est pas un élément de notation critique puisque la perte de cet élément (une photocopie en noir et blanc par exemple) ne change pas l'interprétation du processus. Le tableau 3.6 donne quelques exemples d'utilisation de cette variable visuelle.

Tableau 3.6 Représentation des paramètres reliés aux activités

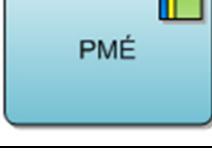
Artéfact	Description
	Activité avec paramètres de processus.
	Activité avec paramètres de production.
	Activité avec résultats.
	Activité avec paramètres de processus, de production et résultats.

Tableau 3.7 Identification du type de PMÉ

Artéfact	Description
	Un PMÉ exécuté par un utilisateur
	Un PMÉ qui n'est pas pris en charge par le système.
	Un PMÉ qui n'est pas utilisateur ni manuel, est considéré automatisé par de l'équipement uniquement.

Enfin, un lien entre les derniers éléments de sémantique est ajouté pour décrire le type de PMÉ représenté par l'artefact « activité » (tableau 3.7). Ainsi, la tâche utilisateur est associée à un PMÉ exécuté dans le MES avec l'interaction d'un usager, la tâche manuelle est associée à un PMÉ qui n'est pas du tout pris en charge par le MES et enfin, une tâche qui n'est ni manuelle, ni utilisateur, est considérée automatisée par de l'équipement uniquement. Une définition similaire a déjà été utilisée par Ricken et Vogel-Heuser (2010).

3.7 Validation

L'étape de validation permet de vérifier que ce qui a été configuré dans le MES correspond à ce qui a été documenté dans le diagramme BPMN. Pour réaliser cette vérification, le MES doit avoir un intergiciel – en anglais *middleware* – conforme à la norme B2MML publiée par ISA-95. La méthode de validation proposée permet de mesurer le degré de concordance du système MES avec le modèle BPMN à partir de trois points de vue différents, soit la définition, l'ordonnancement et les résultats.

Rappelons que la norme B2MML définit des messages XML qui permettent l'échange d'information suivant les modèles objets d'ISA-95. Chaque modèle objet a un message B2MML qui lui est associé. L'utilisation typique de cette norme passe par l'utilisation d'un intergiciel qui agit en tant qu'interpréteur pour convertir le langage du MES et celui des autres systèmes dans le format ISA-95. Par exemple, l'intergiciel d'un MES peut être une application spécialement conçue pour fonctionner avec le MES en question. Cette application connaît toutes les spécificités du MES et est responsable de convertir les différents concepts du MES en objet ISA-95. L'intergiciel agit également en tant que transporteur d'information entre les différents systèmes. La figure 3.9 illustre l'utilisation typique du B2MML entre un MES et un ERP.

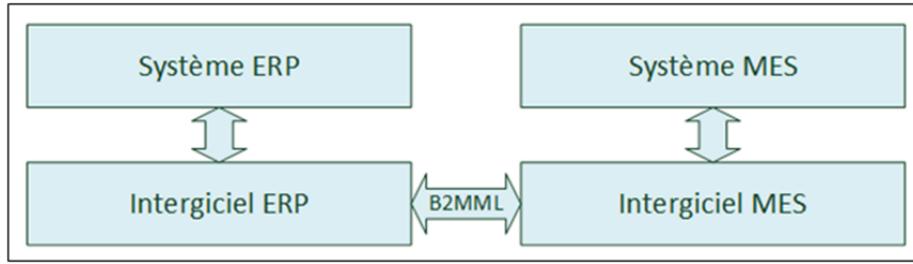


Figure 3.9 Intégration d'un MES avec un ERP en utilisant la norme B2MML

L'utilisation de l'intergiciel B2MML comme interface au MES a comme avantage de présenter toujours de la même façon l'information qui est contenue dans le système. Cet avantage permet de questionner le MES et, avec les liens établis entre les éléments BPMN et les modèles objet, de valider chacun des éléments du modèle. La figure suivante illustre comment l'intergiciel B2MML peut être utilisé pour faire la validation des éléments configurés dans le MES. Dans le cas présent, la transaction *GET* permet d'interroger le MES sur des éléments précis du modèle et la transaction *SHOW* est la réponse retournée par le système (figure 3.11).

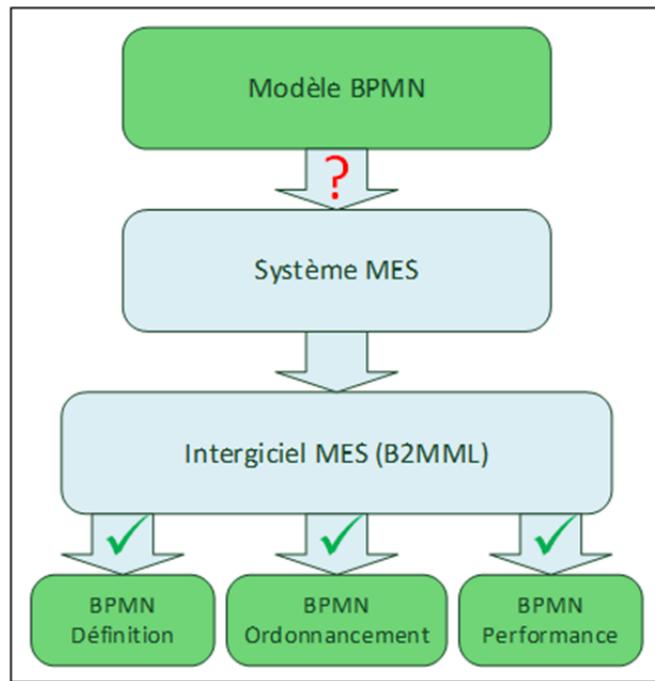


Figure 3.10 Processus de validation avec le BPMN et la norme ISA-95

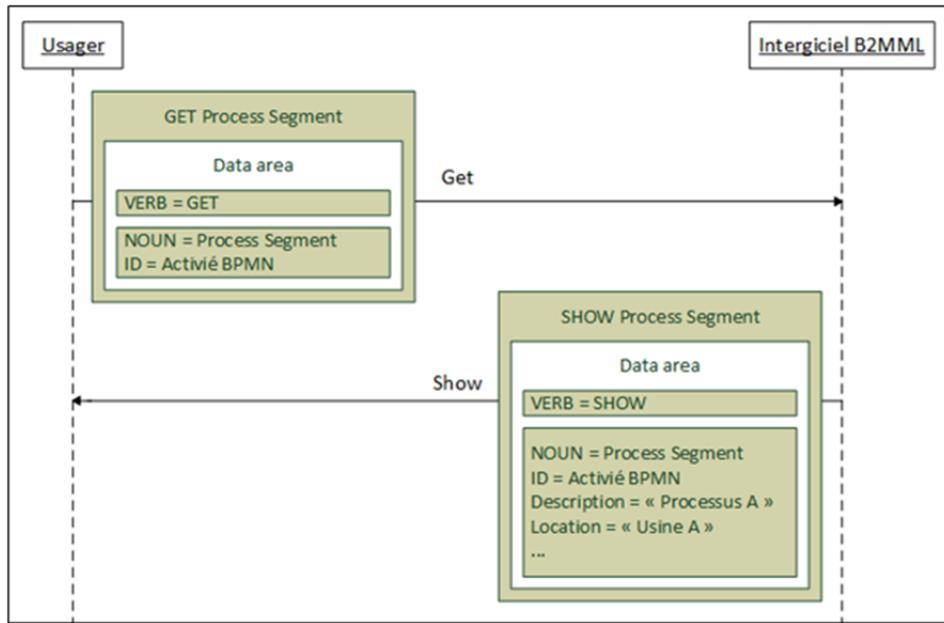


Figure 3.11 Illustration d'une transaction de type *GET-SHOW*

En reprenant les tableaux de la section 3.4, et en vérifiant la présence des objets correspondant à chacun des artefacts, il est possible d'établir la conformité entre les modèles et le MES. La première étape consiste à vérifier tous les équipements de tous les modèles de type exécutable commun. Pour chaque élément, une note de « 1 » est donnée si l'équipement est vérifié par la requête B2MML et une note de « 0 » s'il ne l'est pas. La somme de toutes les notes donne le pointage pour le modèle pour lequel les éléments ont été vérifiés. Dans l'équation ci-dessous, le pointage S_{ij} est la somme des notes où e_{ij} représente le nombre d'éléments à valider dans la sous-classe exécutable commun $i \in E$ et la sous-classe analytique $j \in A$.

$$S_{ij} = \sum_{k=1}^{e_{ij}} x_{ijk} \quad (3.1)$$

Où $x_{ijk} = \begin{cases} 1 & Si correspond \\ 0 & Sinon \end{cases}$

e_{ij} est le nombre d'éléments de la sous-classe exécutable commun $i \in E$ à valider dans la sous-classe analytique $j \in A$.

Le pointage de la sous-classe analytique se calcule à partir des liens établis dans le tableau 3.2. Ici le pointage S_j est la somme des notes y_{jk} où a_j représente le nombre d'éléments à valider dans la sous-classe analytique $j \in A$. La somme de tous les pointages S_{ij} de la sous-classe exécutable commun est ajoutée au pointage de la sous-classe analytique.

$$S_j = \sum_{l=1}^{a_j} y_{jl} + \sum_{i \in E} S_{ij} \quad (3.2)$$

Où $y_{jl} = \begin{cases} 1 & Si correspond \\ 0 & Sinon \end{cases}$

a_j est le nombre d'éléments à valider dans la sous-classe analytique $j \in A$.

Finalement, le pointage de la sous-classe descriptive est la somme de tous les pointages des sous-classes analytique (S_j) et exécutable commun (S_{ij}) et de la somme de toutes les notes pour la présence de chacun des processus d'affaires représentés dans la sous-classe descriptive.

$$S = \sum_{m=1}^d z_m + \sum_{j \in A} S_j \quad (3.3)$$

Où $z_m = \begin{cases} 1 & Si correspond \\ 0 & Sinon \end{cases}$

d est le nombre de processus d'affaires dans la sous-classe descriptive.

À chacune des sous-classes, la conformité entre le système et les modèles peut être calculée à partir du pointage de chacune d'entre elles, du total des éléments validés dans cette sous-classe et de la somme des éléments de toutes les sous-classes inférieures. Par exemple, la conformité d'une sous-classe analytique serait calculée à partir de son pointage S_j , du total des éléments à valider a_j et de la somme des éléments de toutes les sous-classes exécutable commun qu'elle contient. Donc, l'équation 3.4 permet de calculer la conformité d'une sous-

classe exécutable commun, l'équation 3.5 celle d'une sous-classe analytique et l'équation 3.6 celle d'une sous-classe descriptive.

$$C_{ij} = \frac{S_{ij}}{e_{ij}} \quad (3.4)$$

$$C_j = \frac{S_j}{a_j + \sum_{i \in E} e_{ij}} \quad (3.5)$$

$$C = \frac{S}{d + \sum_{j \in A} a_j + \sum_{i \in E} e_{ij}} \quad (3.6)$$

3.8 Conclusion

Les modèles d'intégration de la norme ISA-95 constituent une base solide pour décrire les processus d'affaires d'une entreprise manufacturière. En liant ces modèles à la notation de modélisation BPMN, on obtient une méthode de modélisation qui a plusieurs avantages. Dans un premier temps, la méthode permet d'identifier les éléments à supporter par le MES et d'établir un portrait de la structure physique de l'entreprise. Par la suite, il est possible d'utiliser chacun des éléments identifiés avec les processus d'affaires et de les représenter avec des artefacts BPMN pour en constituer un modèle complet représentant les processus d'affaire à intégrer au MES. Finalement, les liens entre les modèles d'intégration et BPMN permettent d'avoir une méthode de validation normalisée, qui utilise des messages B2MML, avec laquelle il est possible de calculer un indice de conformité entre ce qui a été intégré dans le MES et ce qui a été modélisé.

CHAPITRE 4

DÉMARCHE D'INTÉGRATION

4.1 Introduction

Ce chapitre utilise les informations présentées dans la méthodologie et propose une démarche d'intégration en sept étapes, soit l'identification des fonctions, l'identification du modèle physique, la modélisation dans la sous-classe descriptive, la modélisation dans la sous-classe analytique, la modélisation dans la sous-classe exécutable commun, la configuration du MES et finalement la validation. Chacune de ces étapes est expliquée en détail avec des exemples pour illustrer la méthode. Le chapitre 5 montre un exemple concret d'application.

4.2 Étape 1 – Identifier les fonctions de l'entreprise à inclure

La première étape consiste tout d'abord à identifier les fonctions de l'entreprise qu'il faut considérer dans la démarche d'intégration. L'activité principale d'une entreprise manufacturière est évidemment l'activité de production. Par contre, il y a des activités complémentaires qui visent à supporter cette activité en permettant de la rendre efficace et organisée, de l'améliorer et de la supporter. En plus de l'activité de production, ISA-95 définit les activités d'entretien, de stockage et de qualité. Ces activités ont une valeur ajoutée moins évidente que l'activité de production, mais demeurent une des clés pour avoir une entreprise concurrentielle.

Chacune de ces activités est définie par les huit fonctions du modèle d'activité générique de la gestion des opérations manufacturières (Figure-A I-6) soit l'ordonnancement détaillé, la gestion des ressources, la traçabilité, la répartition, l'analyse, la gestion des définitions, la gestion de l'exécution et la collecte des données. Les intervenants dans le projet d'intégration utilisent le tableau 4.1 afin d'identifier les activités devant être supportées par le MES. Ainsi, on s'assure que la portée du projet est bien définie et qu'aucun élément n'est oublié ou négligé lors de la modélisation des différents processus. À titre d'exemple, le tableau est

rempli avec des fonctions qui pourraient être prises en compte dans l'exemple utilisé tout au long de ce chapitre.

Tableau 4.1 Correspondance des modèles objets avec les activités MOM

		Fonctions							
		Ordonnancement détaillé	Gestion des ressources	Traçabilité	Répartition	Analyse	Gestion des définitions	Gestion de l'exécution	Collecte des données
Activités	Production	X	X	X	X	X	X	X	X
	Entretien	X	X	X	X	X	X	X	X
	Stockage		X	X	X		X		X
	Qualité		X	X		X	X	X	X

4.3 Étape 2 – Identifier le modèle physique de l'entreprise

Avant de commencer la modélisation des processus, il est important d'avoir un portrait clair du modèle physique de l'entreprise (Figure-A I-2). Une liste avec une description des sites, des *areas* ainsi qu'un aperçu de l'équipement qui fera partie de la modélisation permet de mettre en perspective l'ampleur des éléments à modéliser. Enfin, cette étape détermine quels éléments devront être modélisés à chacun des niveaux de la hiérarchie des fonctions. Comme l'illustre la figure 4.1, la méthode privilégiée pour compléter cette étape est une vue en arbre. Cette façon de placer l'information facilite l'identification du niveau hiérarchique auquel se situe l'équipement.

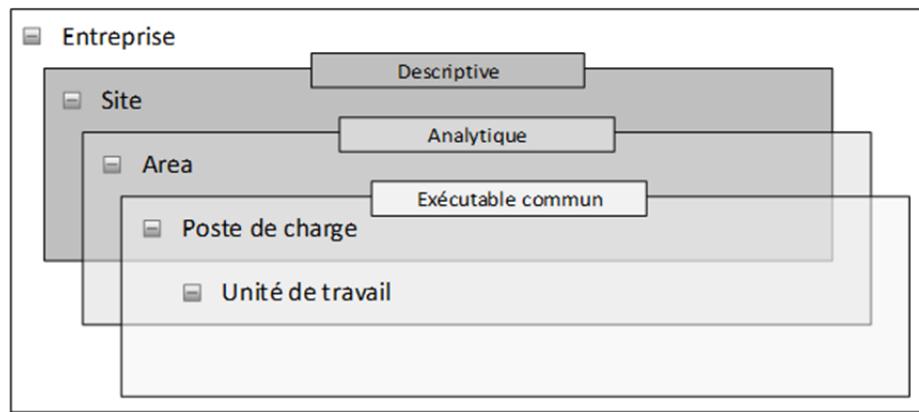


Figure 4.1 Hiérarchie des équipements vus en arbre

Cette deuxième étape n'a pas de liens directs avec la notation BPMN, mais les éléments identifiés seront fort utiles lorsque viendra le temps de bien modéliser chacun des processus. La manière et les outils utilisés ne font pas partie du cadre de la méthodologie proposée et sont laissés à la discrétion du modeleur. Cependant, il est important de respecter les niveaux hiérarchiques pour chacun des éléments. Cela permettra de lier directement les couloirs du diagramme BPMN à la hiérarchie des équipements lors de la phase de modélisation. Les équipements utilisés tout au long de la démarche sont présentés dans le tableau ci-dessous.

Tableau 4.2 Tableau d'identification du modèle physique de l'entreprise

Entité	Type d'entité	Description
Entreprise	Entreprise	
Site 1	Site	
Area 1	Area	
Poste de charge 1	Cellule de travail	
Unité de travail 1	Unité	
Unité de travail 2	Unité	
Poste de charge 2	Cellule de procédé	
Area 2	Area	
Area 3	Area	
Site 2	Site	

4.4 Étape 3 – Faire la modélisation dans la sous-classe descriptive

La modélisation au niveau de la sous-classe descriptive – ou du niveau 4 selon ISA-95 – permet de créer une vue d'ensemble de l'entreprise et de modéliser les interactions entre les processus d'affaires ainsi qu'avec les différents sites, *areas* et postes de charge de l'entreprise. Rappelons que selon le tableau 3.1, pour la sous-classe descriptive, un site d'entreprise est représenté par un *pool* et la modélisation d'interaction entre plusieurs sites d'une même entreprise est supportée par le concept de collaboration. Ceci permet d'illustrer les interactions sous forme de message passé d'un site à un autre. Ainsi, cette phase de modélisation contribue, elle aussi, à définir la portée du projet d'implantation du MES.

Les activités identifiées dans ce niveau de modélisation correspondent à des processus d'affaires et sont représentées par l'élément « sous-processus ». Seuls les produits principaux sont représentés afin de ne pas surcharger le modèle et le niveau de détail correspond généralement à celui recherché dans les ERP. Les principaux éléments utilisés pour ce modèle et leurs interactions sont décrits dans le tableau 3.5. Finalement, la figure 4.2 illustre le rôle joué par chacun des éléments BPMN pour la modélisation dans la sous-classe descriptive.

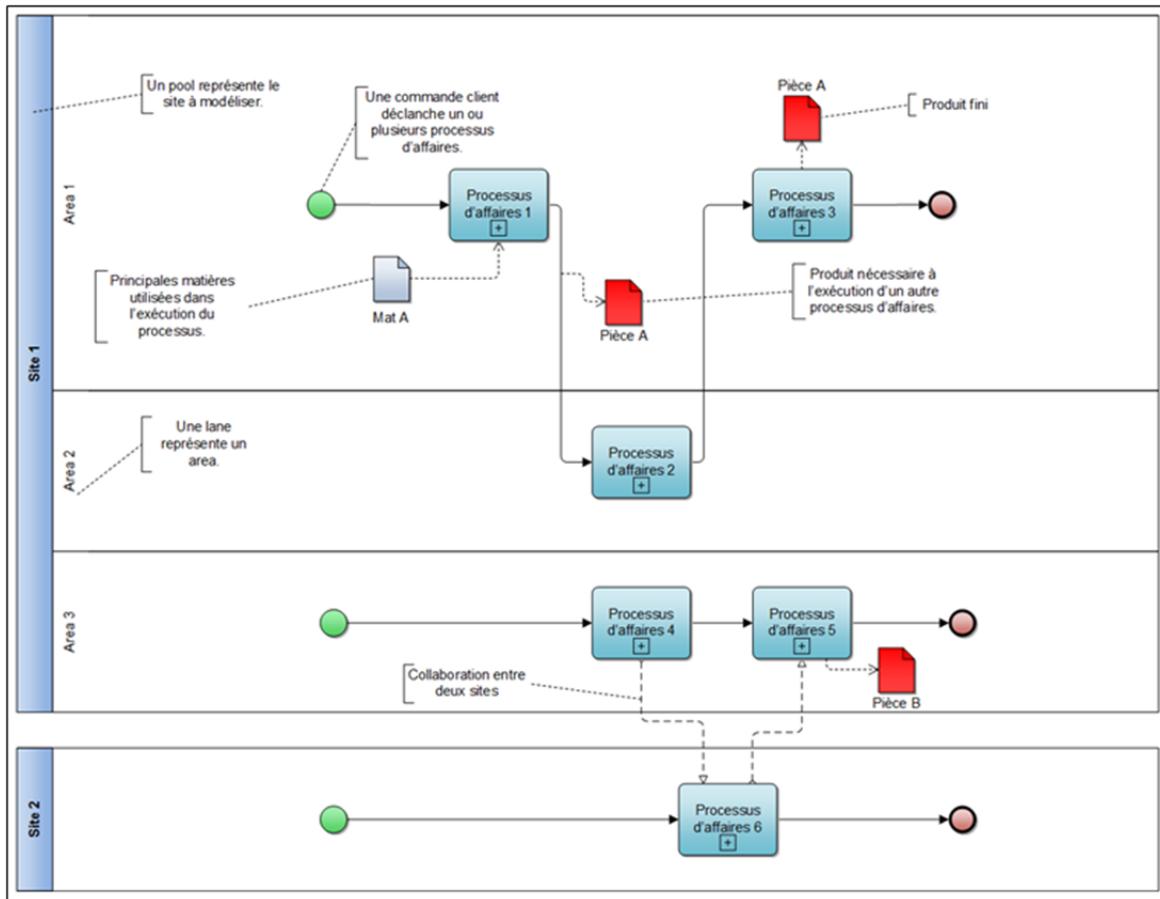


Figure 4.2 Exemple de modélisation dans la sous-classe descriptive

4.5 Étape 4 – Faire la modélisation dans la sous-classe analytique

Chacun des processus d'affaires définis dans la sous-classe descriptive peut maintenant être développé avec le niveau de détail généralement recherché dans les MES. C'est la modélisation dans la sous-classe analytique – ou de niveau 3 selon ISA-95. À cette étape, les informations entrantes et sortantes à la production sont clairement identifiées et un modèle est développé pour chaque produit pouvant faire partie d'une requête de production. Ce produit correspond au *product production rules* d'ISA-95 (tel que définie dans le tableau 3.2).

Tel qu'illustré à la figure 4.3, il y a quelques particularités dans l'utilisation des artefacts BPMN pour la modélisation dans cette sous-classe. Entre autres, l'élément « activité » peut

contenir une icône de l'objet de données (data object). À l'aide de la couleur, cette icône permet d'identifier le type des paramètres (et des résultats) qui sont impliqués dans le processus. Rappelons que le bleu identifie les paramètres de processus, les jaunes les paramètres de production et le vert les résultats (voir tableau 3.6). Tel que définie dans le tableau 3.5, l'objet de données est aussi utilisé pour représenter de la matière ou des produits finis et semi-finis. Ce dernier cas est représenté dans la Figure 4.3 avec la pièce A qui apparaît à deux endroits comme produit semi-fini (entre deux activités) et comme produit fini (sortant d'une activité).

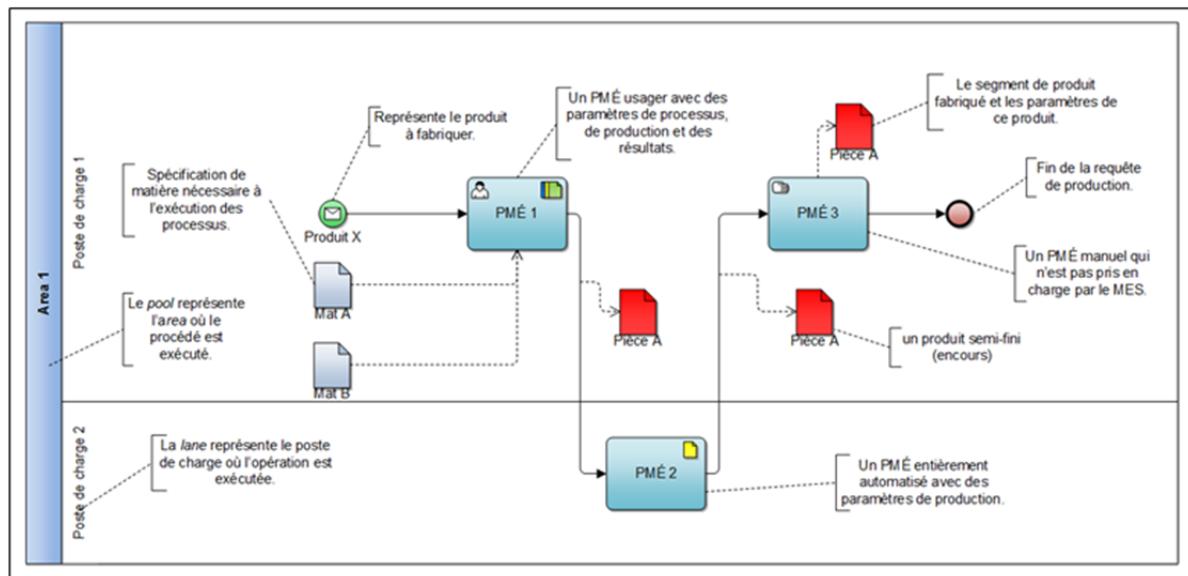
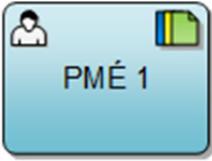


Figure 4.3 Exemple de modélisation dans la sous-classe analytique

Enfin, les tâches utilisateurs et tâches manuelles permettent de préciser le type de processus. Selon BPMN 2.0 une tâche utilisateur (user task) est une tâche effectuée par un humain avec l'assistance d'un logiciel d'application – comme un MES. Une tâche manuelle est, pour sa part, une tâche qui n'est pas gérée dans un système. En d'autres termes, le système ne fait pas le suivi sur le début et l'achèvement de la tâche. Un processus qui n'est ni utilisateur ni manuel est considéré comme un processus entièrement automatisé. Par exemple, un processus exécuté par un automate sans aucune intervention humaine (voir Tableau 3.7).

Pour des raisons de clarté sur les diagrammes, les paramètres, les résultats et l'information sur le personnel ne sont pas illustrés directement sur le schéma de modélisation. Ces informations sont plutôt documentées dans les attributs de chaque tâche. Certains outils permettent de lier ces attributs aux artefacts par le biais de fichiers ou de bases de données, facilitant ainsi l'organisation des toutes les informations liées aux différents éléments du modèle. Ces attributs supplémentaires ajoutés au diagramme sont supportés par le concept d'extensibilité de BPMN (Figure-A II-1) qui permet d'ajouter des éléments permettant de répondre à un besoin spécifique relié au domaine d'application. Les extensions pour le « PMÉ 1 » sont présentées dans le tableau 4.3.

Tableau 4.3 Extension des artefacts BPMN pour le « PMÉ 1 »

Artéfact	Type d'extension	Valeur
 PMÉ 1	Paramètres de processus	Paramètre 1 et paramètre 2
	Paramètres de production	Paramètre A
	Résultats	Résultat 1
	Classe de personnel	Opérateur classe A
 Pièce A	Paramètres de produit	Paramètre 3
	Paramètres de production	Paramètre B et paramètre C
	Résultats	Résultat 2 et résultat 3
	Classe de personnel	Opérateur classe A
 Mat A	Paramètres de produit	Paramètre 4
	Paramètres de production	Paramètre D
	Résultats	Résultat 4
	Classe de personnel	Opérateur classe A

4.6 Étape 5 – Faire la modélisation dans la sous-classe d'exécutable commun

Le dernier niveau est modélisé dans la sous-classe d'exécutable commun – correspondant aux niveaux 2, 1 et 0 selon ISA-95. Ce niveau contient l'information nécessaire à l'exécution précise de toutes les tâches d'un PMÉ. Dans ce modèle, le *pool* est un poste de charge et représente l'endroit où est exécuté le PMÉ. Les *lanes*, représentent une unité de travail, par exemple un équipement permettant l'exécution d'une ou plusieurs tâches.

Ainsi, le niveau de détails rencontré dans le modèle d'exécutable commun correspond aux informations nécessaires dans les systèmes de commande de processus – en anglais, *process control system* (PCS) – et dans les procédures d'opération uniformisées – en anglais, *Standard Operating Procedure* (SOP). Ce niveau de détail est bien au-delà de ce qui est requis par le MES, cependant, ce modèle apporte un supplément d'information nécessaire au MES quant aux équipements utilisés lors de l'exécution de chacune des tâches. La figure 4.4 montre un exemple de modélisation dans la sous-classe d'exécutable commun.

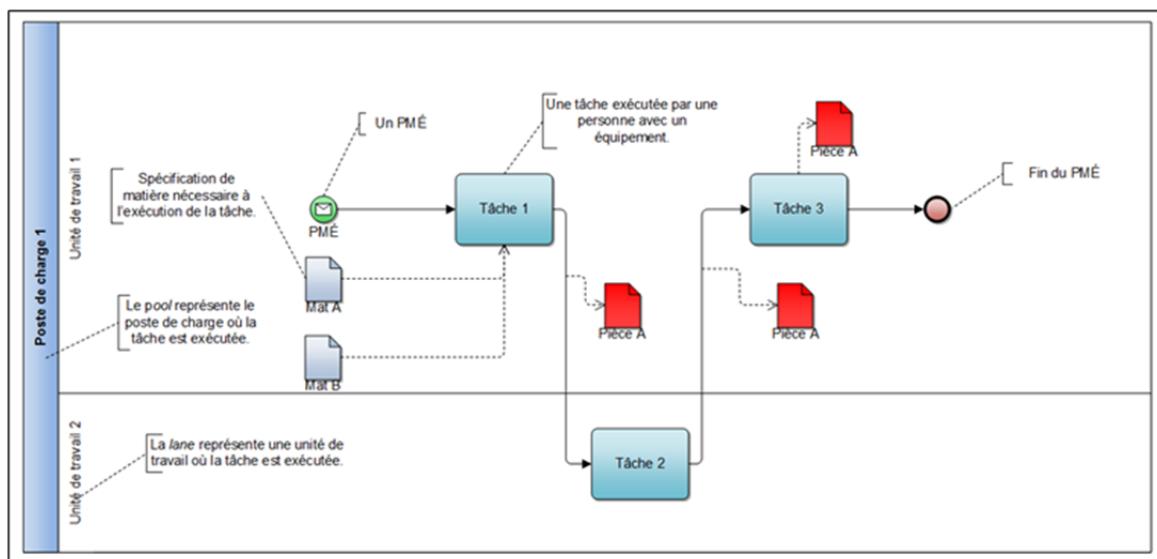


Figure 4.4 Exemple de modélisation dans la sous-classe d'exécutable commun

4.7 Étape 6 – Configurer le MES

Cette étape peut se faire de différentes façons. Par exemple, la méthode d'intégration « big bang » consiste à faire l'intégration de tous les modules de façon simultanée alors que la méthode incrémentale consiste à la faire par bloc (par module ou par processus). De nombreux ouvrages font déjà états des avantages et inconvénients de l'une ou l'autre de ces méthodes, notamment pour l'intégration de système ERP. Ce mémoire se concentre à modéliser, documenter et valider le processus d'intégration d'un système MES et laisse le lecteur explorer d'autres sources afin de déterminer la méthode à utiliser pour faire la configuration et la mise en place du système MES.

4.8 Étape 7 – Validation

Maintenant que les ressources du site sont identifiées, que les processus sont documentés à l'aide des diagrammes BPMN et que le système est configuré, la dernière étape consiste à valider l'information entrée dans le MES avec ce qui a été documenté. Cette validation se fait à partir de trois points de vue différents, soit celui de la définition, de l'ordonnancement et de la performance. Dans les sections qui suivent, les liens entre les artefacts et les objets des différents modèles sont explicités avec des exemples correspondant aux modèles BPMN de chacune des sous-classes présentées en exemple dans ce chapitre.

4.8.1 Validation de la définition

La première validation se fait à partir des modèles de définition d'ISA-95, soit le modèle de définition de produit et le modèle de segment de processus (Figure-A I-5). Cette validation permet de mesurer le niveau de conformité des processus et des produits définis dans le système avec la modélisation BPMN. Puisqu'il y a deux modèles objet à vérifier, deux requêtes de type « GET » sont nécessaires : la requête « *GetProcessSegment* » pour les segments de processus et la requête « *GetProcessDefinition* » pour les définitions de produit.

La figure 4.5 montre un exemple de transaction B2MML permettant d'interroger le MES pour un segment de processus et la figure 4.6 un exemple de réponse reçue du système.

```

1  <?xml version="1.0" encoding="utf-8"?>
2  <GetProcessSegment>
3      <ApplicationArea>
4          <Sender>...</Sender>
5          <CreationDateTime>2013-08-25T18:50:35.00</CreationDateTime>
6      </ApplicationArea>
7      <DataArea>
8          <Get />
9          <ProcessSegment>
10         <ID schemeName="BPMN Activity">string</ID>
11         </ProcessSegment>
12     </DataArea>
13 </GetProcessSegment>
```

Figure 4.5 Exemple de message B2MML pour une requête de type « GET »

```

1  <?xml version="1.0" encoding="utf-8"?>
2  <ShowProcessSegment>
3      <ApplicationArea>
4          <Sender>...</Sender>
5          <CreationDateTime>2013-08-27T10:24:17.54</CreationDateTime>
6          <UserArea />
7      </ApplicationArea>
8      <DataArea>
9          <Show />
10         <ProcessSegment>
11             <ID>string</ID>
12             <Description>string</Description>
13             <HierarchyScope>...</HierarchyScope>
14             <PersonnelSegmentSpecification>...</PersonnelSegmentSpecification>
15             <EquipmentSegmentSpecification>...</EquipmentSegmentSpecification>
16             <PhysicalAssetSegmentSpecification>
17             ...
18             </PhysicalAssetSegmentSpecification>
19             <MaterialSegmentSpecification>...</MaterialSegmentSpecification>
20             <Parameter>...</Parameter>
21             <SegmentDependency>...</SegmentDependency>
22         </ProcessSegment>
23     </DataArea>
24     ...
25 </ShowProcessSegment>
```

Figure 4.6 Exemple de message B2MML pour une réponse de type « SHOW »

Les tableaux 4.4 à 4.6 énumèrent les éléments à rechercher dans la réponse de type « *SHOW* » pour la requête « *GetProcessSegment* ». Pour chacune des sous-classes, les éléments donnés en exemple dans la troisième colonne correspondent aux diagrammes de la section modélisation de ce chapitre (figure 4.2, figure 4.3, figure 4.4). Pour chaque PMÉ et chaque processus d'affaires, il y a une requête différente qui doit être envoyée au système.

Tableau 4.4 Éléments de la sous-classe exécutable commun pour le « PMÉ 1 »

Artéfact	Objet ISA-95	Éléments à rechercher dans la réponse de type « <i>SHOW</i> » en référence à la figure 4.4
<i>Lane</i>	<i>Equipment segment specification</i>	Unité de travail 1, unité de travail 2

Tableau 4.5 Éléments de la sous-classe analytique pour le « PMÉ 1 »

Artéfact	Objet ISA-95	Éléments à rechercher dans la réponse de type « <i>SHOW</i> » en référence à la figure 4.3 et au tableau 4.3
Activité	<i>Process segment</i>	PMÉ 1
<i>Lane</i>	<i>Location</i>	Poste de charge 1
Extension d'activité de type « paramètre de processus »	<i>Process segment parameter</i>	Paramètre 1, Paramètre 2
Extension d'activité de type « personnel »	<i>Personnel segment specification</i>	PMÉ 3 : Opérateur classe A
Objet de données (matière)	<i>Material segment specification</i>	Mat A, Mat B
Extension d'objet de données de type « spécification de matière »	<i>Material segment specification property</i>	Mat A : Paramètre 4

Tableau 4.6 Éléments de la sous-classe descriptive pour le « processus d'affaires 1 »

Artéfact	Objet ISA-95	Éléments à rechercher dans la réponse de type « <i>SHOW</i> » en référence à la figure 4.4
Sous-processus	<i>Process segment</i>	Processus d'affaire 1

Tableau 4.7 Éléments de la sous-classe analytique pour le produit X

Artéfact	Objet ISA-95	Éléments à rechercher dans la réponse de type « <i>SHOW</i> » en référence à la figure 4.3 et au tableau 4.3
Événement de départ	<i>Product production rule</i>	Produit X
<i>Pool</i>	<i>Location</i>	<i>Area 1</i>
Activité	<i>Process segment</i>	PMÉ 1, PMÉ 2, PMÉ 3
Objet de données (matière)	<i>Material specification</i>	Mat A, Mat B
Extension d'objet de données de type « spécification de matière »	<i>Material specification property</i>	MAT A : Paramètre 4
Objet de données (segment de produit)	<i>Product segment</i>	Pièce A
Extension d'objet de données de type « paramètre de segment de produit »	<i>Product parameter</i>	Pièce A : Paramètre 3
Extension d'objet de données de type « personnel »	<i>Personnel specification</i>	Pièce A : Opérateur classe A

La requête « *GetProductDefinition* », quant à elle, correspond à tous les éléments du modèle de la sous-classe analytique. Donc, contrairement à la requête pour les segments de processus, une seule requête est nécessaire pour valider l'ensemble des éléments des sous-classes analytique et exécutable commun. En réalité, l'information contenue dans ce modèle

objet correspond au processus d'affaires en entier. La particularité du modèle de définition de produit est que l'information qu'il contient ne se retrouve que dans la sous-classe analytique puisque les deux autres sous-classes ne font référence qu'à des objets appartenant au segment de processus. Le tableau 4.7 présente les artéfacts à vérifier avec en exemple les éléments du modèle présenté à la figure 4.3.

4.8.2 Validation de l'ordonnancement de la production

La deuxième validation se fait à partir du modèle d'ordonnancement d'ISA-95. Cette validation permet de mesurer le niveau de conformité de la requête de production définie dans le système avec la modélisation BPMN. Il est important de rappeler un détail important concernant la validation de l'ordonnancement : le modèle objet d'ordonnancement de la production a, selon ISA-95, une correspondance avec le modèle objet de définition de produit ou avec le modèle objet de segment de processus. Autrement dit, le MES fait l'ordonnancement des produits ou celui des processus, pas les deux. Dans le cas de la présente démarche, un MES qui fait l'ordonnancement des produits a été étudié. Il n'y a donc pas d'information sur les processus (activité BPMN) dans le tableau de la sous-classe analytique (tableau 4.9) et le tableau descriptif est inexistant puisque son seul artéfact à vérifier est un processus (sous-processus BPMN). De plus, comme la sous-classe exécutable commun représente un PMÉ et que ce concept n'existe pas dans un ordonnancement de type produit, la validation de chacun des PMÉ passe par l'interrogation de tous les segments de produit qui sont traités par ce PMÉ.

Ainsi, pour le modèle du « PMÉ 1 », le segment de produit pour lequel il faut interroger le système est la pièce A. L'unique relation entre le modèle de la sous-classe exécutable commun et les objets ISA-95 est présentée dans le tableau 4.8. Un autre cas aurait pu être étudié où le MES aurait fait l'ordonnancement de processus. Dans ce cas, les éléments à valider dans le modèle objet de la performance de la production seraient différents. Ces éléments sont identifiés par des astérisques dans le tableau 3.2.

Tableau 4.8 Éléments de la sous-classe exécutable commun pour le PMÉ 1

Artéfact	Objet ISA-95	Éléments à rechercher dans la réponse de type « <i>SHOW</i> » en référence à la figure 4.4
<i>Lane</i>	<i>Equipment specification</i>	Unité de travail 1, unité de travail 2

Tableau 4.9 Éléments de la sous-classe analytique pour le produit X

Artéfact	Objet ISA-95	Éléments à rechercher dans la réponse de type « <i>SHOW</i> » en référence à la figure 4.3 et au tableau 4.3
Événement de départ	<i>Production request</i>	Requête de production du produit X
<i>Pool</i>	<i>Location</i>	<i>Area 1</i>
Objet de données (matière)	<i>Material consumed requirement</i>	Mat A, Mat B
Extension d'objet de données de type « spécification de matière »	<i>Material consumed requirement property</i>	MAT A : Paramètre D
Objet de données (segment de produit)	<i>Segment requirement</i>	Pièce A
Extension d'objet de données de type « paramètre de segment de produit »	<i>Production parameter</i>	Pièce A : Paramètre B, Paramètre C
Extension d'objet de données de type « personnel »	<i>Personnel requirement</i>	Pièce A : Opérateur classe A

4.8.3 Validation de la performance de la production

La dernière validation se fait à partir du modèle de performance de la production d'ISA-95. Cette validation permet de mesurer le niveau de conformité des réponses de production obtenues dans le MES avec la modélisation BPMN. Bien entendu, pour réaliser cette validation, il faut que la fabrication du produit ait été exécutée réellement. Il est important de mentionner que le modèle de performance de la production, tel que défini par ISA-95, ne fait qu'offrir un modèle permettant d'enregistrer de l'information sur l'exécution réelle d'un processus, les ressources utilisées et les matières produites. L'intention de ce modèle n'est donc pas de statuer sur la performance du système de production, mais plutôt d'en faire le suivi. Le tableau 4.10 présente les éléments de la sous-classe exécutable et le tableau 4.11 ceux de la sous-classe analytique.

Tableau 4.10 Éléments de la sous-classe exécutable commun pour la pièce A

Artéfact	Objet ISA-95	Éléments à rechercher dans la réponse de type « SHOW » en référence à la figure 4.4
<i>Lane</i>	<i>Equipment specification</i>	Unité de travail 1, unité de travail 2

Tableau 4.11 Éléments de la sous-classe analytique pour le produit X

Artéfact	Objet ISA-95	Éléments à rechercher dans la réponse de type « SHOW » en référence à la figure 4.3 et au tableau 4.3
Événement de départ	<i>Production response</i>	Réponse de production du produit X
<i>Lane</i>	<i>Location</i>	Poste de charge 1, poste de charge 2
Activité	<i>Segment response</i>	PMÉ 1
Extension d'activité de type « paramètre de processus »	<i>Production data</i>	Résultat 1
Extension d'activité de type « personnel »	<i>Personnel actual</i>	PMÉ 3 : Opérateur classe A
Objet de données (matière)	<i>Material consumed actual</i>	Mat A, Mat B
Extension d'objet de données de type « spécification de matière »	<i>Material consumed actual property</i>	MAT A : Résultat 4
Objet de données (segment de produit)	<i>Material produced actual</i>	Pièce A
Extension d'objet de données de type « paramètre de segment de produit »	<i>Material produced actual property</i>	Pièce A : Résultat 2, Résultat 3

4.8.4 Calcul de la conformité

Les équations 3.1 à 3.3, présentées dans la méthodologie (section 3.7), permettent de calculer la conformité pour chacun des modèles BPMN avec le MES. Par exemple, en reprenant le tableau 4.8 utilisé pour la validation de l'ordonnancement de la sous-classe exécutable commun, les unités de travail 1 et 2 sont les « *equipment specification* » à valider dans le « *product segment* » de la réponse « *GetProductionRequest* » du produit X. En appliquant l'équation 3.1, on peut calculer le pointage S_{ij} de ce PMÉ. Le tableau 4.12 présente les résultats de la validation détaillée pour le « PMÉ 1 » au niveau de l'ordonnancement.

Tableau 4.12 Validation détaillée pour le « PMÉ 1 »

« PMÉ 1 » (i = 1) du « Processus d'affaire 1 » (j = 1)				
Artéfact	Objet ISA-95	Éléments à rechercher	Correspondance B2MML	Note (x_{ijk})
<i>Lane</i>	<i>Equipment specification</i>	Unité de travail 1 (K = 1)	<pre><EquipmentRequirement> <EquipmentClassID> Unité de travail </EquipmentClassID> <EquipmentID> Unité de travail 1 </EquipmentID> ... </EquipmentRequirement></pre>	1
		Unité de travail 2 (K = 2)	<pre><EquipmentRequirement> <EquipmentClassID> Unité de travail </EquipmentClassID> <EquipmentID> Unité de travail 2 </EquipmentID> ... </EquipmentRequirement></pre>	1

À partir de l'équation 3.1, on peut calculer le pointage S_{ij} de la validation détaillée pour le « PMÉ 1 ». Ensuite, en appliquant ce pointage à l'équation 3.4, on obtient la conformité C_{ij} pour ce modèle. Ces calculs sont montrés aux équations 4.1 et 4.2.

$$S_{ij} = \sum_{k=1}^{e_{ij}} x_{ijk} = x_{111} + x_{112} = 2 \quad (4.1)$$

Où $i = 1$, pour le « PMÉ 1 »

$j = 1$, pour le « Processus d'affaire 1 »

$k = \{1,2\}$, pour l'élément à rechercher

$$x_{ijk} = \begin{cases} 1 & Si correspond \\ 0 & Sinon \end{cases}$$

$e_{ij} = 2$, le nombre d'éléments dans le « PMÉ 1 » du « processus d'affaire 1 »

$$C_{ij} = \frac{S_{ij}}{e_{ij}} = \frac{2}{2} = 1 \quad (4.2)$$

En faisant le même travail pour tous les PMÉ du « Processus d'affaires 1 », il est possible de calculer les résultats S_{ij} et C_{ij} pour les « PMÉ 2 » et « PMÉ 3 ». Afin de pouvoir calculer le pointage dans la sous-classe analytique, des valeurs fictives ont été attribuées dans le tableau 4.13 pour ces derniers PMÉ.

Tableau 4.13 Valeurs de e_{ij} et S_{ij} pour le « Processus d'affaire 1 »

Processus d'affaires	PMÉ	e_{ij}	S_{ij}	$C_{ij} = \frac{S_{ij}}{e_{ij}}$
Processus d'affaires 1 ($j = 1$)	PMÉ 1 ($i = 1$)	2	2	1.00
	PMÉ 2 ($i = 2$)	1	1	1.00
	PMÉ 3 ($i = 3$)	3	2	0.66
Total		6	5	

Lorsque les pointages de tous les PMÉ sont calculés pour un processus d'affaires, la même démarche s'applique pour la validation détaillée du processus d'affaires. Dans le cas du « Processus d'affaires 1 », utilisé à titre d'exemple, les artéfacts du tableau 4.9 sont validés à

partir de la même réponse B2MML que pour la validation du PMÉ 1. Cette fois-ci, le pointage est calculé avec l'équation 3.2 et la conformité avec l'équation 3.5. Le tableau 4.14 présente une partie des résultats détaillés pour la validation du processus d'affaires 1. Le tableau complet est en annexe (Tableau-A IV-1).

Tableau 4.14 Validation détaillée pour le processus d'affaires 1

« Processus d'affaire 1 » (j = 1)				
Artéfact	Objet ISA-95	Éléments à rechercher	Correspondance B2MML	Note (y_{jl})
Événement de départ	<i>Production request</i>	Requête de production du produit X ($l = 1$)	<pre><ProductionRequest> <ID>WO #1</ID> <Description> Requête de production #1 </Description> <ProductProductionRuleID> Produit X </ProductProductionRuleID> ... <ProductionRequest></pre>	1
<i>Pool</i>	<i>Location</i>	<i>Area 1</i> ($l = 2$)	<pre><ProductionRequest> <ID>WO #1</ID> ... <Location> Area 1 </Location> ... <ProductionRequest></pre>	1
Objet de données (matière)	<i>Material consumed requirement</i>	Mat A ($l = 3$)	<pre><MaterialRequirement> <MaterialClassID> Mat A </MaterialClassID> <Description> Matière A </Description> <MaterialUse> Consumed </MaterialUse> ... </MaterialRequirement></pre>	1
		Mat B ($l = 4$)	s.o.	0

$$S_j = \sum_{l=1}^{a_j} y_{jl} + \sum_{i \in E} S_{ij} = 8 + 5 = 13 \quad (4.3)$$

Où $j = 1$ pour le « Processus d'affaires 1 »

$1 = \{1..9\}$ pour l'élément à rechercher

$$y_{jl} = \begin{cases} 1 & Si correspond \\ 0 & Sinon \end{cases}$$

$a_j = 9$ le nombre d'élément dans le « Processus d'affaire 1 »

Comme à l'étape de la sous-classe d'exécutable commun, la démarche doit être répétée pour chaque processus d'affaires modélisé dans la sous-classe analytique. Le tableau suivant présente les résultats obtenus pour le « Processus d'affaires 1 » et donne des valeurs fictives pour les cinq autres processus d'affaires définis dans la sous-classe descriptive.

Tableau 4.15 Valeurs de a_j et S_j pour l'ensemble des processus d'affaires

Processus d'affaires	a_j	$\sum_{i \in E} e_{ij}$	S_j	$C_j = \frac{S_j}{a_j + \sum_{i \in E} e_{ij}}$
Processus d'affaire 1 ($j = 1$)	9	6	13	0.87
Processus d'affaire 2 ($j = 2$)	8	3	11	1.00
Processus d'affaire 3 ($j = 3$)	15	9	24	1.00
Processus d'affaire 4 ($j = 4$)	12	5	16	0.94
Processus d'affaire 5 ($j = 5$)	9	4	11	0.85
Processus d'affaire 6 ($j = 6$)	10	4	14	1.00
Total	63	31	89	—

Maintenant que les pointages des sous-classes exécutable commun et analytique sont complétés, la même démarche peut s'appliquer à la sous-classe descriptive. Toutefois, puisqu'il n'y pas d'éléments à valider dans cette dernière sous-classe lorsque la validation se fait du point de vue de l'ordonnancement, le terme $\sum_{m=0}^d z_m$ de l'équation 3.3 devient égal à zéro et l'équation devient simplement la sommation des pointages de l'étape de validation précédente.

$$S = \sum_{m=0}^d z_m + \sum_{j \in A} S_j = (0) + (13 + 11 + 24 + 16 + 11 + 14) = 89 \quad (4.4)$$

$$C = \frac{S}{d + \sum_{j \in A} (a_j + \sum_{i \in E} e_{ij})} = \frac{89}{(15 + 11 + 24 + 17 + 13 + 14)} = 0.95 \quad (4.5)$$

Où $d = 0$, le nombre d'éléments à vérifier dans la sous-classe descriptive

La conformité entre les processus d'affaires documentés avec BPMN et le MES est donc de 0.95 lorsque la validation est faite avec le point de vue de l'ordonnancement. Dans un cas réel de validation, il faudrait appliquer la même démarche de calcul de la conformité pour les points de vue de la définition et de la performance. Enfin, pour tous les résultats de conformité différents de 1, il faudrait appliquer des corrections au MES, ou à tout le moins expliquer les causes des différences identifiées.

4.9 Conclusion

La démarche d'intégration présentée dans ce chapitre est un mode d'emploi pas à pas pour identifier et modéliser des processus d'affaires à intégrer dans un MES ainsi qu'à les valider. Chacune des étapes permet de structurer une partie de l'information selon les modèles d'intégration de la norme ISA-95. La démarche est construite de telle sorte que l'information établie à une étape soit préalable à l'étape suivante. Au finale, on obtient des processus documentés et modélisés dans un format compréhensible à des intervenants de disciplines

différentes et surtout dans un format facilitant la configuration du MES. De plus, l'étape de validation permet de quantifier le degré de conformité entre les modèles établis et le système mis en place. Dans le chapitre suivant, cette démarche est mise en application dans un contexte réel d'intégration d'un processus d'affaires pour une entreprise manufacturière de haute technologie.

CHAPITRE 5

VALIDATION DE LA DÉMARCHE PROPOSÉE

5.1 Introduction

La validation de la démarche présentée aux chapitres 3 et 4 est réalisée en l'appliquant à un cas réel sur les processus d'affaires d'une entreprise de haute technologie. Cette entreprise fabrique des câbles capteur de température à base de fibre optique. Dans cette entreprise, chaque produit est fabriqué sur demande et la traçabilité de chacune des pièces assemblées est cruciale. Ce mode de production privilégié par l'entreprise se qualifie de « production de petite série ». Ce qui veut dire que l'usine est organisée en postes de charge orientés vers des processus spécialisés et exécutés par de la main-d'œuvre qualifiée. Pour des raisons de confidentialité, le nom de l'entreprise n'est pas mentionné et elle sera appelée l'entreprise Z. La figure 5.1 représente une partie de l'ensemble des processus d'affaires servant à la fabrication des câbles capteurs. Le processus en surbrillance est le processus d'affaires « Fabrication du câble » qui servira d'exemple tout au long de ce chapitre.

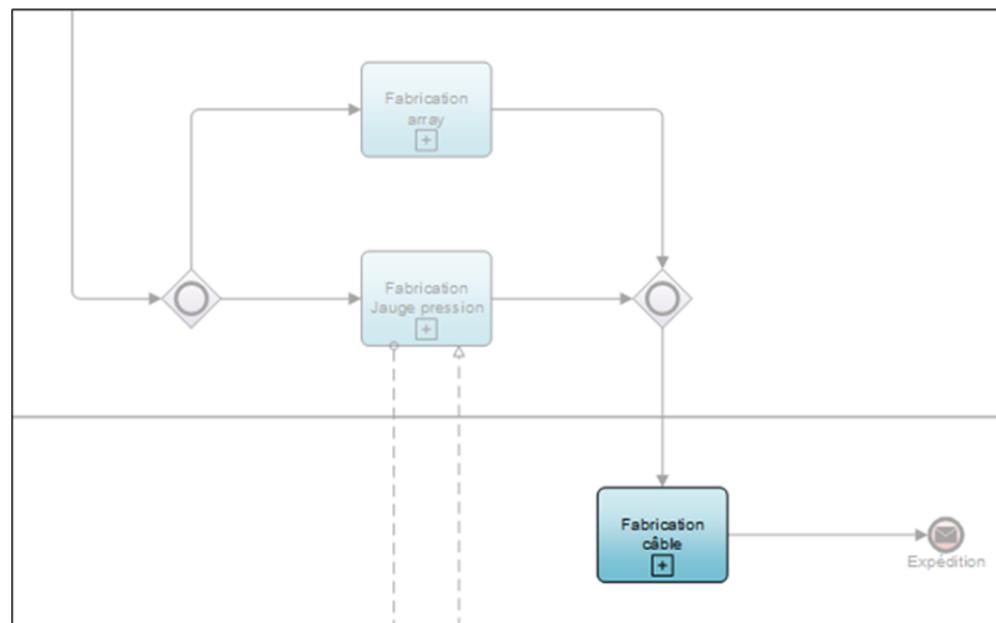


Figure 5.1 Processus d'affaires « Fabrication du câble »

Dans ce chapitre, les processus d'affaires et les processus métiers élémentaires ont été modélisés selon la démarche proposée au chapitre 4 et c'est le processus d'affaires « Fabrication du câble » qui est utilisé pour faire les validations de définition, d'ordonnancement et de performance.

5.2 Fonction de l'entreprise

La première étape de la démarche d'intégration est l'identification des fonctions que l'entreprise Z désire inclure dans le nouveau MES. Dans cette étude de cas, c'est l'activité de production qui requiert le plus de fonctions. En effet, pour cette activité, seule la fonction de répartition n'est pas requise. Les activités d'entretien, de stockage et de qualité, quant à elles, requièrent moins de fonctions que l'activité de production. Par exemple, la fonction de gestion des ressources, identifiée comme étant nécessaire à l'activité de production, a été identifiée non nécessaire aux autres activités en raison de la faible utilisation des ressources dans la réalisation des activités reliées à cette fonction. Le tableau 5.1, identifie les fonctions supportées par le système développé dans le cadre de la validation.

Tableau 5.1 Fonctions de l'entreprise faisant partie du projet d'intégration

Activités	Fonctions							
	Ordonnancement détaillé	Gestion des ressources	Traçabilité	Répartition	Analyse	Gestion des définitions	Gestion de l'exécution	Collecte des données
Production	X	X	X		X	X	X	X
Entretien			X		X	X	X	X
Stockage			X			X		X
Qualité	X		X		X	X	X	X

Comme mentionné dans la méthodologie, l'identification des fonctions de l'entreprise dans les différentes sphères d'activité est surtout utile lorsque vient le temps de faire la sélection du MES et des options de ce dernier.

Dans les sections qui suivent, l'accent est mis sur l'activité de production uniquement. Ceci permet de limiter les processus à modéliser tout en utilisant la démarche d'intégration dans son intégralité. Effectivement, puisque la méthode qui consiste à identifier, modéliser et valider, est la même d'une activité à l'autre, il n'est pas nécessaire de faire l'exercice avec des fonctions dans chacune des activités pour présenter la démarche.

5.3 Modèle physique de l'entreprise

Le modèle physique de l'entreprise Z est composé de plusieurs sites situés un peu partout à travers le monde. Cependant, la mise en place du MES ne s'applique qu'à deux de ces sites. Dans le tableau 5.2, les entités de l'entreprise sont représentées sous la forme d'une vue en arbre afin de clairement identifier la hiérarchie de chacun de ces éléments. Le type d'entité et une brève description de l'entité complètent le tableau.

Dans les sections qui suivent, tous les processus qui sont modélisés ont lieu dans la cellule de travail « Ass. Câble 1 ». C'est pour cette raison que seule cette cellule de travail est élaborée jusqu'au plus petit élément de la hiérarchie des équipements, soit les unités de travail. Cela permet de ne pas surcharger le tableau 5.2. Dans les autres cas, la hiérarchie des équipements est précisée jusqu'au niveau des postes de charge uniquement.

Tableau 5.2 Modèle physique de l'entreprise « Z »

Entité	Type d'entité	Description
Entreprise Z	Entreprise	Entreprise œuvrant dans l'industrie pétrolière
St-Laurent	Site	Usine de fabrication de câbles capteur de température
Préparation fibre	<i>Area</i>	Zone de préparation de la fibre optique
Fab. Câble	<i>Area</i>	Zone regroupant les opérations d'assemblage du câble
Calibration 1	Cellule de travail	Utilisé pour l'étalonnage des câbles
Cuisson 1	Cellule de procédé	Utilisé pour la cuisson des câbles
Ass. Câble 1	Cellule de travail	Utilisé pour l'assemblage de la fibre avec le câble
Pompe	Unité	Équipement pour l'assemblage
Inter. optique	Unité	Équipement de mesure optique (spectrale)
OTDR	Unité	Équipement de mesure optique (temporelle)
Ass. Tip	Cellule de travail	Utilisé pour l'assemblage de l'embout de câble
Qualité 1	Cellule de travail	Utilisé pour faire les mesures de qualité finales
Salle blanche	<i>Area</i>	Zone de salle-blanche pour les opérations sur la fibre optique
Fibre 1	Ligne de production	Utilisé pour la production de fibre optique
Fibre 2	Ligne de production	Utilisé pour la production de fibre optique
Lanham	Site	Site de fabrication de jauge de pression
Fab. Jauge	<i>Area</i>	Zone regroupant les opérations de fabrication des jauge de pression
Ass. Jauge	Cellule de travail	Utilisé pour l'assemblage des jauge de pression
Étalonnage	Cellule de travail	Utilisé pour l'étalonnage des jauge de pression

5.4 Modélisation dans la sous-classe descriptive

Rappelons que la modélisation dans la sous-classe descriptive permet de créer une vue d'ensemble de l'entreprise. Dans le cas présent, les processus d'affaires représentés sont les processus nécessaires à la fabrication d'un câble capteur de température. Ces processus s'exécutent dans quatre *Areas* différents situés sur deux sites. L'ensemble des activités de fabrication est contenu dans six processus d'affaires distincts et, pour l'entreprise Z, chacun de ces processus d'affaires peut faire l'objet d'une requête de production. Tous les *areas* et les sites apparaissant dans la figure 5.2 sont définis dans le modèle physique de l'entreprise (tableau 5.2).

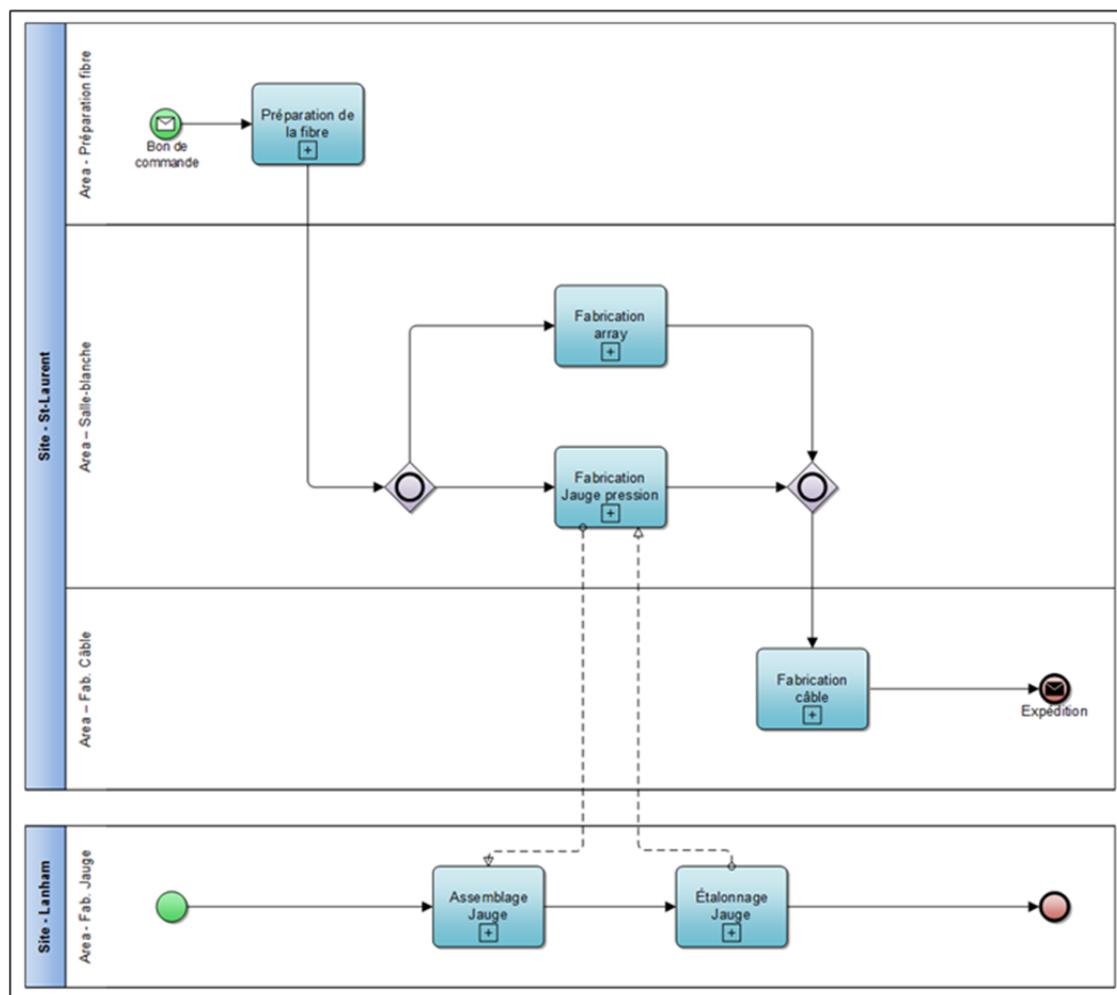


Figure 5.2 Ensemble des processus d'affaires

5.5 Modélisation dans la sous-classe analytique

Parmi les six processus d'affaires modélisés à la section précédente, c'est le processus « Fabrication du câble » qui est utilisé pour faire la modélisation dans la sous-classe analytique (figure 5.3). Ce processus, composé de six PMÉ, est exécuté dans cinq postes de charge différents. Il représente les activités nécessaires à la réalisation de la requête de production du produit « Câble ». Dans le diagramme, le produit semi-fini « Câble » est représenté sur le flux de séquence entre l'activité « Assemblage câble » et l'activité « Cuisson ». Comme défini dans le Tableau 3.5, la propagation de produit câble est implicite jusqu'à la dernière activité où le câble devient un produit fini.

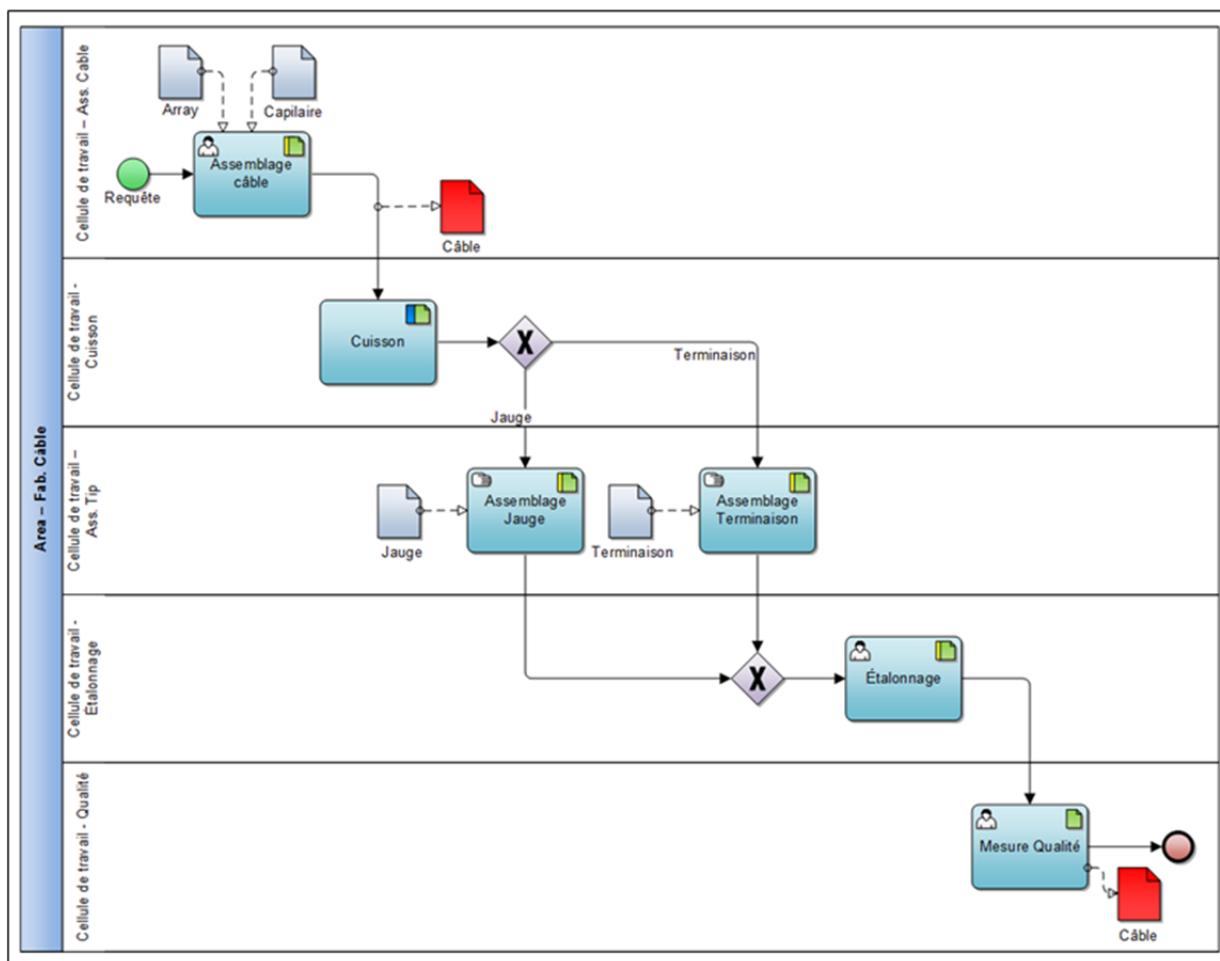


Figure 5.3 Processus d'affaires « Fabrication du câble »

Le processus d'affaire « Fabrication du câble » présente quatre matières entrantes qui sont consommées dans trois activités différentes. Cependant, seulement trois matières entrantes seront réellement consommées puisque les activités « Assemblage Jauge » et « Assemblage Terminaison » passent par une passerelle de type exclusif et donc, qu'une seule de ces deux activités sera exécutée.

L'information sur les paramètres de production, les paramètres de processus, les résultats attendus et le personnel nécessaire à l'exécution du PMÉ est ajoutée sous forme d'extension et n'est pas visible sur le diagramme. Chaque logiciel de modélisation BPMN a ses particularités sur la façon de gérer – ou de ne pas gérer – les extensions. Dans ce cas-ci, le logiciel utilisé pour faire la modélisation est Microsoft Visio et les extensions sont définies dans les données de forme. Dans la figure 5.4, ce sont les extensions d'activité qui sont représentées. La donnée de forme « *Personnel class* » représente l'extension de type « personnel » alors que les données « *Process parameter* », « *Production parameter* » et « *Production data* » représentent respectivement les extensions de type « paramètre de processus » pour les points de vue de définition, d'ordonnancement et de performance. Toutes les extensions et leurs valeurs utilisées dans le processus d'affaires « Fabrication du câble » sont résumées dans le tableau 5.3.

DONNÉES DE FORME - TASK.125	
Task Type	User
Loop: Normal	FALSE
Compensation	FALSE
Loop: Parallel Multiple Instances	FALSE
Loop: Sequential Multiple Instances	FALSE
Call Activity	FALSE
Process parameter	
Production parameter	Longueur finale
Production data	Température mesurée moyenne
Personnel class	Opérateur classe B

Figure 5.4 Exemple de données liées à une tâche dans Visio

Tableau 5.3 Extensions du processus d'affaires « Fabrication du câble »

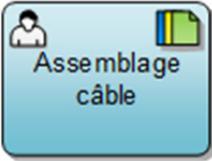
Artéfact	Type d'extension	Valeur
 Assemblage câble	Paramètres de processus	Débit
	Paramètres de production	Type de câble, longueur préliminaire, longueur finale
	Résultats	Pression, acquisition finale, mesure OTDR finale, mesure spectrale finale
	Classe de personnel	Opérateur classe B
 Cuisson	Paramètres de processus	Débit d'azote
	Paramètres de production	s.o.
	Résultats	Pointe maximum, nombre de pointes, température moyenne, longueur d'onde moyenne
	Classe de personnel	Technicien, opérateur classe A
 Assemblage Jauge	Paramètres de processus	s.o.
	Paramètres de production	Type de jauge, type du capillaire
	Résultats	Mesure spectrale; Vérification de preuve.
	Classe de personnel	Technicien, ingénieur mécanique
 Assemblage Terminaison	Paramètres de processus	s.o.
	Paramètres de production	Type du capillaire
	Résultats	Mesure spectrale
	Classe de personnel	Opérateur classe A
 Étalonnage	Paramètres de processus	s.o.
	Paramètres de production	Longueur finale
	Résultats	Température mesurée, température calculée, longueur d'onde moyenne
	Classe de personnel	Opérateur classe B

Tableau 5.3 Extensions du processus d'affaires « Fabrication du câble » (suite)

Artéfact	Type d'extension	Valeur
 Mesure Qualité	Paramètres de processus	s.o.
	Paramètres de production	s.o.
	Résultats	Niveau de bruit, longueur OTDR niveau relatif
	Classe de personnel	Opérateur classe B, ingénieur optique
 Câble	Paramètres de produit	Type d'embout, nombre de points
	Paramètres de production	Type d'embout, nombre de points, longueur, nom du client
	Résultats	Longueur, mesure OTDR
	Classe de personnel	Opérateur classe A, opérateur classe B, technicien, ingénieur mécanique, ingénieur optique
 Array	Paramètres de produit	Longueur, nombre de points
	Paramètres de production	Numéro de série
	Résultats	Longueur mesurée
	Classe de personnel	Opérateur classe B
 Capillaire	Paramètres de produit	Longueur, type
	Paramètres de production	Longueur, type
	Résultats	Longueur mesurée
	Classe de personnel	Opérateur classe B
 Jauge	Paramètres de produit	Type de Jauge
	Paramètres de production	Position, type
	Résultats	s.o.
	Classe de personnel	Technicien, ingénieur mécanique
 Terminaison	Paramètres de produit	Matériel
	Paramètres de production	Matériel
	Résultats	s.o.
	Classe de personnel	Opérateur classe A

5.6 Modélisation dans la sous-classe exécutable commun

Les diagrammes de la sous-classe exécutable commun sont ceux qui contiennent le plus grand niveau de détails. En effet, l'information contenue dans ce diagramme permet d'exécuter avec précision toutes les étapes à faire pour compléter le PMÉ. Pour illustrer ce niveau de modélisation, c'est le PMÉ « Assemblage câble » qui est utilisé parmi les six PMÉ du processus d'affaires « Fabrication du câble ». Ce PMÉ est exécuté dans la cellule de travail « Ass. Câble » et utilise trois équipements différents, soit une pompe MJ, un OTDR et un interrogateur optique (figure 5.5). Puisque le PMÉ « Assemblage câble » (Figure 5.3) consomme les matières entrantes « Capillaire » et « Array », il est normal de les retrouver dans le diagramme illustrant de détails de ce PMÉ. Dans cette sous-classe, ces matières sont consommées respectivement aux tâches « Ajustement » et « Assemblage préliminaire ».

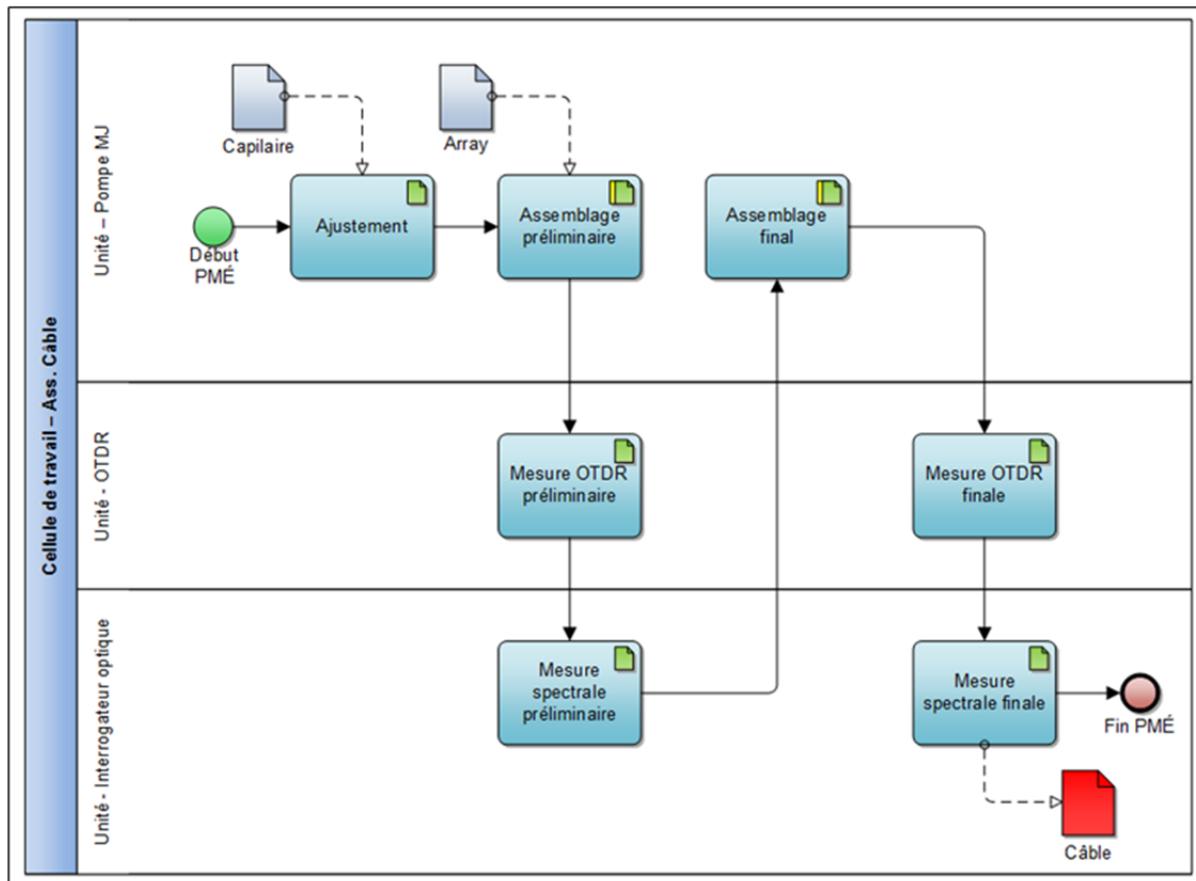


Figure 5.5 PMÉ « Assemblage Câble »

Comme à la modélisation de la sous-classe analytique, des extensions de type « paramètre » peuvent être utilisées pour apporter de l'information supplémentaire sur la nature des données nécessaires à l'exécution de chacune des tâches. Cependant, l'information contenue dans toutes les extensions de la sous-classe exécutable commun doit représenter exactement la même information que celle contenue dans l'activité qui la représente dans la sous-classe analytique. Autrement dit, l'utilisation des extensions au niveau de l'exécutable commun n'apporte aucune information supplémentaire quant aux paramètres utiles au MES puisque les paramètres qui sont dans le tableau 5.4 le sont aussi dans le tableau 5.3.

Tableau 5.4 Extensions du PMÉ « Assemblage Câble »

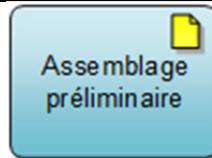
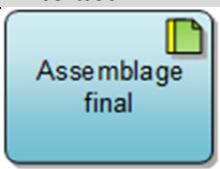
Artéfact	Type d'extension	Valeur
 Ajustement	Paramètres de processus	s.o.
	Paramètres de production	s.o.
	Résultats	Pression
	Classe de personnel	Opérateur classe B
 Assemblage préliminaire	Paramètres de processus	s.o.
	Paramètres de production	longueur préliminaire
	Résultats	s.o.
	Classe de personnel	Opérateur classe B
 Meure OTDR préliminaire	Paramètres de processus	s.o.
	Paramètres de production	s.o.
	Résultats	s.o.
	Classe de personnel	Opérateur classe B
 Meure spectrale préliminaire	Paramètres de processus	s.o.
	Paramètres de production	s.o.
	Résultats	s.o.
	Classe de personnel	Opérateur classe B

Tableau 5.4 Extensions du PMÉ « Assemblage Câble » (suite)

Artéfact	Type d'extension	Valeur
	Paramètres de processus	s.o.
	Paramètres de production	Longueur finale
	Résultats	Acquisition finale
	Classe de personnel	Opérateur classe B
	Paramètres de processus	s.o.
	Paramètres de production	s.o.
	Résultats	Mesure OTDR finale
	Classe de personnel	Opérateur classe B
	Paramètres de processus	s.o.
	Paramètres de production	s.o.
	Résultats	Mesure spectrale finale
	Classe de personnel	Opérateur classe B

5.7 Configuration des systèmes

Les processus sont configurés dans deux systèmes différents. Le premier est un système qui a été développé pour répondre aux besoins spécifiques de l'entreprise Z pour faire le suivi de la production. Ce système est composé d'une base de données conçue à partir des modèles objets d'ISA-95 et de fonctions implémentant les messages B2MML de type *SHOW* pour chacun des modèles objets. Ce système n'est pas un MES proprement dit, mais contient tous les éléments permettant de définir, de planifier, d'exécuter et d'analyser les performances pour toutes les activités de production.

Le deuxième système est le MES *Proficy* de GE. Dans ce système, deux modules sont essentiellement utilisés pour faire la validation. Le premier module est le progiciel *Plant Applications* qui sert à l'automation et à l'intégration de l'information reliée aux activités de gestion de la production, ainsi qu'à l'exécution et à l'optimisation de la performance. Le deuxième module est le progiciel *Open Enterprise* qui est un connecteur bidirectionnel de

communication entre le niveau de gestion d'entreprise (sous-classe descriptive) et le niveau de gestion de la production (sous-classe analytique). Ce connecteur est compatible avec la norme B2MML.

5.8 Validation de la définition

La première étape pour mesurer la conformité entre les diagrammes BPMN et le MES est la validation du point de vue de la définition. Pour réaliser cette étape, deux modèles objet d'ISA-95 sont utilisés : le modèle de définition de produit et le modèle de segment de processus.

5.8.1 Validation de la définition de produit

Pour valider la présence du processus d'affaires « Fabrication câble », tous les PMÉ qui sont illustrés dans ce processus doivent être validés. Alors, comme ce processus d'affaires représente les étapes de fabrications pour le produit « Câble », il s'agit donc de valider ce processus et les six PMÉ qui le composent avec la requête pour la définition de produit « Câble ». Ainsi pour valider la présence de ces éléments dans le système, un message de type « *GET* » est envoyé au MES et la réponse « *SHOW* » issue de cette requête contient toute l'information nécessaire pour faire la vérification dans les trois sous-classes. En conséquence, de l'exemple de requête B2MML de type « *GET* » du chapitre 4 (figure 4.5), on peut créer la requête pour la définition de produit « Câble » (figure 5.6). La figure 5.7 illustre les interactions entre l'intergiciel B2MML du MES et l'usager pour faire la requête du produit « Câble ». Normalement, l'intergiciel B2MML du MES communique avec un autre intergiciel – celui d'un ERP par exemple. Dans ce cas-ci, comme les messages ont été envoyés de façon manuelle, l'interlocuteur est représenté par l'usager qui a envoyé le message B2MML à l'intergiciel.

```

1  <?xml version="1.0" encoding="utf-8"?>
2  <GetProductDefinition>
3      <ApplicationArea>
4          <Sender>...</Sender>
5          <CreationDateTime>2013-08-25T18:50:35.00</CreationDateTime>
6      </ApplicationArea>
7      <DataArea>
8          <Get />
9          <ProductDefinition>
10             <ID schemeName="Câble">string</ID>
11             <ProcessSegment>
12         </DataArea>
13     </ ProductDefinition >

```

Figure 5.6 Exemple de requête B2MML pour la définition de produit « Câble »

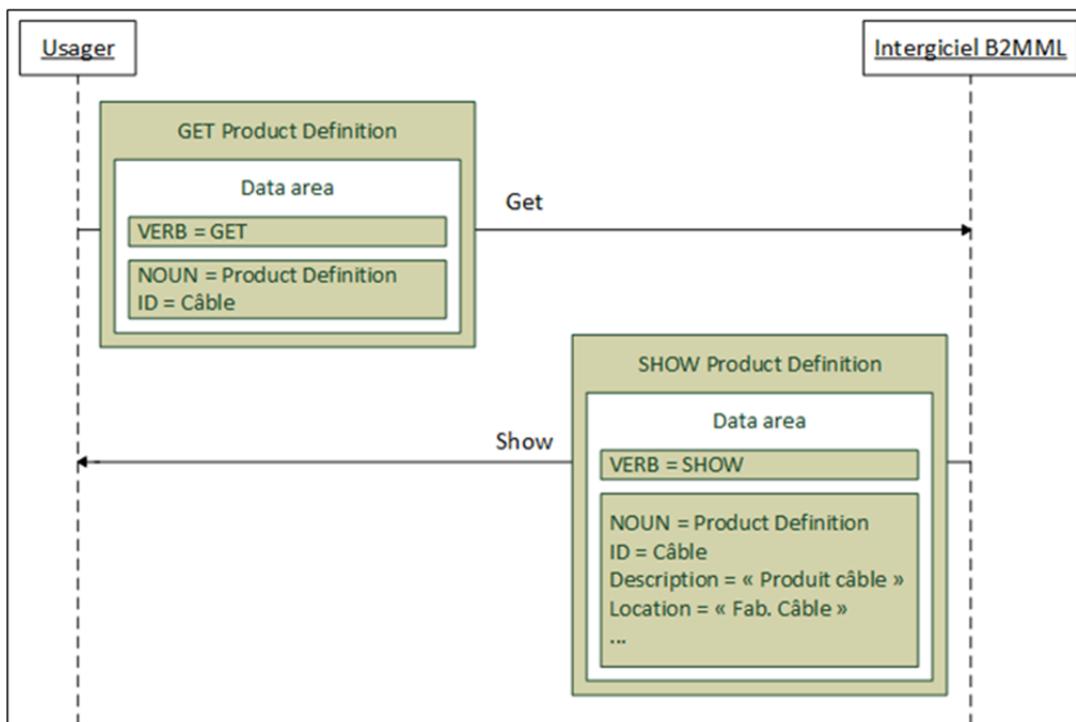


Figure 5.7 Illustration de la transaction pour la validation du produit « Câble »

Le tableau 5.5 montre en détail comment la validation pour chaque *Lane* de la sous-classe exécutable commun se fait pour le PMÉ « assemblage de câble ». Dans ce cas en particulier, les éléments recherchés sont l'interrogateur optique, l'OTDR et la pompe MJ. Ces équipements doivent se retrouver dans la réponse de type « *SHOW* » en réponse à la requête « *GetProductDefinition* » pour la définition de produit « Câble ».

Tableau 5.5 PMÉ « Assemblage câble » dans la définition de produit

PMÉ « Assemblage Câble » (i = 1) du processus d'affaires « Fabrication du câble » (j = 4)				
Requête = <i>GetProductDefinition</i> : Câble				
Artéfact	Objet ISA-95	Élément recherché (k)	Correspondance B2MML	Note (x_{ijk})
<i>Lane</i>	<i>Equipment specification</i>	Interrogateur optique (1)	<pre><EquipmentSpecification> <EquipmentClassID>Intérogateur optique</EquipmentClassID> <EquipmentID>SM #1</EquipmentID> <Description>Interrogateur optique</Description> <Quantity> <QuantityString>1</QuantityString> <DataType>double</DataType> <UnitOfMeasure>Unit</UnitOfMeasure> </Quantity> </EquipmentSpecification></pre>	1
		OTDR (2)	<pre><EquipmentSpecification> <EquipmentClassID>OTDR</EquipmentClassID> <Description>OTDR</Description> <Quantity> <QuantityString>1</QuantityString> <DataType>double</DataType> <UnitOfMeasure>Unit</UnitOfMeasure> </Quantity> </EquipmentSpecification></pre>	1
		Pompe MJ (3)	<pre><EquipmentSpecification> <EquipmentClassID>Pompe MJ</EquipmentClassID> <Description>Pompe</Description> <Quantity> <QuantityString>1</QuantityString> <DataType>double</DataType> <UnitOfMeasure>Unit</UnitOfMeasure> </Quantity> </EquipmentSpecification></pre>	1

La même démarche s'applique pour la vérification des cinq PMÉ restants – soit la cuisson, l'assemblage de la jauge, l'assemblage de la terminaison, l'étalonnage et la mesure qualité. Par la suite, pour la validation du processus d'affaires « Fabrication du câble » dans la sous-classe analytique, les informations recherchées se trouvent dans la même réponse de type « *SHOW* » que pour les PMÉ. Le tableau 5.6 montre les résultats des correspondances entre la réponse B2MML et les artéfacts BPMN de cette sous-classe. Le tableau détaillé avec les

preuves de correspondance se trouve à l'ANNEXE III (Tableau-A III-2). Dans ce tableau, une note de « 1 » a été attribuée lorsque la correspondance peut être vérifiée dans la réponse B2MML et une note de « 0 » quand elle ne peut pas l'être. À titre d'exemple, l'artefact objet de données matière « Capillaire » a une note de « 0 » puisque la réponse B2MML ne contient pas l'objet ISA-95 de type « *Material specification* » pour cette matière. De la même façon, toutes les extensions d'objet de données de type spécification de matière n'ont pas trouvé de correspondance pour la matière capillaire puisque l'objet ISA-95 « *Materiel specification property* » est un composant l'objet « *Material specification* ».

Tableau 5.6 Processus d'affaires « Fabrication du câble » – définition de produit

Processus d'affaires « Fabrication du câble » (j = 4)			
Requête = <i>GetProductDefinition</i> : Câble			
Artéfact	Objet ISA-95	Élément recherché (<i>l</i>)	Note (<i>y_{jl}</i>)
Pool	<i>Location</i>	Fab. Cable (1)	1
Événement	<i>Product production rule</i>	Câble (2)	1
Activité	<i>Process segment</i>	Assemblage câble (3) Cuisson (4) Assemblage Jauge (5) Assemblage terminaison (6) Étalonnage (7) Mesure Qualité (8)	1 1 1 1 1 1
Objet de données (matière)	<i>Material specification</i>	Array (9) Capillaire (10) Terminaison (11) PG (12)	1 0 1 1
Extension d'objet de données de type « spécification de matière »	<i>Material specification property</i>	Array : Longueur (13) Array : Nombre de points (14)	1 1

Tableau 5.6 Processus d'affaires « Fabrication du câble » – définition de produit (suite)

Processus d'affaires « Fabrication du câble » (j = 4)			
Requête = GetProcessSegment : Assemblage Câble			
Artéfact	Objet ISA-95	Élément recherché (l)	Note (y_{jl})
Extension d'objet de données de type « spécification de matière »	<i>Material specification</i>	Capillaire : Type (15)	0
		Capillaire : Longueur (16)	0
		Jauge : Type (17)	1
		Terminaison : Matériel (18)	1
Objet de données (segment de produit)	<i>Product segment</i>	Câble (19)	1
Extension d'objet de données de type « paramètre de segment de produit »	<i>Product parameter</i>	Câble : Type d'embout (20)	1
		Câble : Nombre de points (21)	1
Extension d'objet de données de type « personnel »	<i>Personnel specification</i>	Câble : Opérateur classe A (22)	1
		Câble : Opérateur classe B (23)	1
		Câble : Technicien (24)	1
		Câble : Ingénieur mécanique (25)	1
		Câble : Ingénieur optique (26)	

5.8.2 Validation des segments de processus

Maintenant, pour vérifier la correspondance entre les modèles BPMN et le modèle segment de processus, la requête « *GetProcessSegment* » est envoyé au MES avec le nom du processus comme identifiant. Contrairement à la validation de la définition de produit, où toutes les correspondances pour le processus d'affaires et tous les PMÉ sont dans la même requête, la validation du segment de processus nécessite une requête distincte pour le processus d'affaires et pour chacun des PMÉ. Par exemple la figure 5.8, permet d'obtenir l'information pour le PMÉ « Assemblage câble ».

```

1  <?xml version="1.0" encoding="utf-8"?>
2  <GetProcessSegment>
3      <ApplicationArea>
4          <Sender>...</Sender>
5          <CreationDateTime>2013-08-25T18:50:35.00</CreationDateTime>
6      </ApplicationArea>
7      <DataArea>
8          <Get />
9          <ProcessSegment>
10         <ID schemeName="Assemblage Câble">string</ID>
11     </ProcessSegment>
12   </DataArea>
13 </GetProcessSegment>

```

Figure 5.8 Requête B2MML pour le PMÉ « Assemblage câble »

Les tableaux qui suivent montrent les résultats obtenus pour la validation sur chacun des trois niveaux de modélisation : le niveau exécutable commun (tableau 5.7), le niveau analytique (tableau 5.8) et le niveau descriptif (tableau 5.9). Dans la sous-classe analytique, l'objet de données pour la matière « Capillaire » est inexistant de la même façon qu'il l'était dans la validation de la définition de produit.

Tableau 5.7 PMÉ « Assemblage Câble » dans le segment de processus

PMÉ « Assemblage Câble » (i = 1) du processus d'affaires « Fabrication du câble » (j = 4)			
Requête = <i>GetProcessSegment</i> : Assemblage Câble			
Artéfact	Objet ISA-95	Élément recherché (k)	Note (x_{ijk})
<i>Lane</i>	<i>Equipment specification</i>	Interrogateur optique (4)	1
		OTDR (5)	1
		Pompe MJ (6)	1

Tableau 5.8 Processus d'affaires « Fabrication du câble » – segment de processus

Processus d'affaires « Fabrication du câble » (j = 4)				
Requête	Artéfact	Objet ISA-95	Élément recherché (l)	Note (y _{jl})
Assemblage Câble	Activité	<i>Process segment</i>	Assemblage Câble (27)	1
	<i>Lane</i>	<i>Location</i>	Ass. Câble (28)	1
	Extension d'activité de type « paramètre de processus »	<i>Process segment parameter</i>	Débit (29)	1
	Extension d'activité de type « personnel »	<i>Personnel segment specification</i>	Opérateur classe B (30)	1
	Objet de données (matière)	<i>Material segment specification</i>	Capillaire (31)	0
			Array (32)	1
	Extension d'objet de données de type « spécification de matière »	<i>Material segment specification property</i>	Array : Nombre de points (33)	1
			Array : Longueur (34)	1
	Extension d'objet de données de type « spécification de matière »	<i>Material segment specification property</i>	Capillaire : Type (35)	0
			Capillaire : Longueur (36)	0
Cuisson	Activité	<i>Process segment</i>	Cuisson (37)	1
	<i>Lane</i>	<i>Location</i>	Cuisson (38)	1
	Extension d'activité de type « paramètre de processus »	<i>Process segment parameter</i>	Débit d'azote (39)	1
	Extension d'activité de type « personnel »	<i>Personnel segment specification</i>	Technicien (40)	1
			Opérateur classe A (41)	1
Assemblage Jauge	Activité	<i>Process segment</i>	Assemblage Jauge (42)	1
	<i>Lane</i>	<i>Location</i>	Ass. Tip (43)	1
	Extension d'activité de type « personnel »	<i>Personnel segment specification</i>	Technicien (44)	1
			Ingénieur mécanique (45)	1
	Objet de données (matière)	<i>Material segment specification</i>	Jauge (46)	1
	Extension d'objet de données de type « spécification de matière »	<i>Material segment specification property</i>	Jauge : Type de jauge (47)	1

Tableau 5.8 Processus d'affaires « Fabrication du câble » – segment de processus (suite)

Processus d'affaires « Fabrication du câble » (j = 4)				
Requête	Artéfact	Objet ISA-95	Élément recherché (l)	Note (y _{jl})
Assemblage Terminaison	Activité	<i>Process segment</i>	Assemblage Terminaison (48)	1
	<i>Lane</i>	<i>Location</i>	Ass. Tip (49)	1
	Extension d'activité de type « personnel »	<i>Personnel segment specification</i>	Opérateur classe A (50)	1
	Objet de données (matière)	<i>Material segment specification</i>	Terminaison (51)	1
	Extension d'objet de données de type « spécification de matière »	<i>Material segment specification property</i>	Terminaison : Matériel (52)	1
Étalonnage	Activité	<i>Process segment</i>	Étalonnage (53)	1
	<i>Lane</i>	<i>Location</i>	Étalonnage (54)	1
	Extension d'activité de type « personnel »	<i>Personnel segment specification</i>	Opérateur classe B (55)	1
Mesure Qualité	Activité	<i>Process segment</i>	Qualité (56)	1
	<i>Lane</i>	<i>Location</i>	Qualité (57)	1
	Extension d'activité de type « personnel »	<i>Personnel segment specification</i>	Opérateur classe B (58)	1
			Ingénieur optique (59)	1

Tableau 5.9 Ensemble des processus d'affaires pour le site St-Laurent

Processus d'affaires du site St-Laurent			
Artéfact	Objet ISA-95	Élément recherché (m)	Note (z _m)
Sous-processus	<i>Process segment</i>	Préparation de la fibre (1)	1
		Fabrication array (2)	1
		Fabrication jauge de pression (3)	1
		Fabrication du câble (4)	1

5.8.3 Mesure de conformité de la définition

Les résultats obtenus par la validation du PMÉ « Assemblage de câble » au niveau de la définition de produit et du segment de processus, permettent de calculer un pointage S_{ij} pour la sous-classe exécutable commun. Le tableau 5.5 et le tableau 5.7, totalisent en tout six validations d'équipement (e_{ij}) qui ont été vérifiés avec succès (trois équipements vérifiés deux fois par chacun des deux modèles objet), ce qui donne un pointage de 6.

$$S_{ij} = \sum_{k=1}^{e_{ij}} x_{ijk} = 6 \quad (5.1)$$

Les valeurs de e_{ij} et de S_{ij} calculées pour le PMÉ « Assemblage de câble » sont rapportées dans le tableau 5.10 et la conformité est calculée à l'aide de l'équation 3.1. Les valeurs pour les cinq autres PMÉ sont montrées à titre d'exemple pour permettre de calculer la conformité au niveau des autres sous-classes.

Tableau 5.10 Valeurs de e_{ij} et S_{ij} pour la « Fabrication du câble »

Processus d'affaires (j)	PMÉ (i)	e_{ij}	S_{ij}	$C_{ij} = \frac{S_{ij}}{e_{ij}}$
Fabrication du câble (4)	Assemblage Câble (1)	6	6	1.00
	Cuisson (2)	2	2	1.00
	Assemblage Jauge (3)	4	4	1.00
	Assemblage Terminaison (4)	4	4	1.00
	Étalonnage (5)	8	8	1.00
	Mesure Qualité (6)	6	6	1.00
Total		30	30	_____

Le calcul des pointages pour la sous-classe analytique est basé sur les tableaux de la définition de produit (tableau 5.6) et des segments de processus (tableau 5.8). Ces deux tableaux totalisent en tout 59 éléments à valider (a_j) dont 53 ($\sum_{l=1}^{a_j} y_{jl}$) qui ont trouvé une correspondance dans les réponses B2MML. Le pointage pour cette sous-classe inclut les pointages de la sous-classe exécutable commun (S_j) soit un total de 30.

$$S_j = \sum_{l=1}^{a_j} y_{jl} + \sum_{i \in E} S_{ij} = 53 + 30 = 83 \quad (5.2)$$

Les valeurs de a_j et de S_j ainsi obtenues pour le processus d'affaires « fabrication du câble » sont rapportées dans le tableau 5.11 et la conformité est calculée à l'aide de l'équation 3.2. Les valeurs pour les trois autres processus d'affaires du site St-Laurent, sont montrées à titre d'exemple pour permettre de calculer la conformité au niveau de la sous-classe descriptive.

Tableau 5.11 Valeurs de a_j et S_j pour les processus d'affaires du site St-Laurent

Processus d'affaires (j)	a_j	$\sum_{i \in E} e_{ij}$	S_j	$C_j = \frac{S_j}{a_j + \sum_{i \in E} e_{ij}}$
Préparation de la fibre (1)	10	8	18	1.00
Fabrication array (2)	62	52	114	1.00
Fabrication jauge de pression (3)	38	36	74	1.00
Fabrication du câble (4)	59	30	83	0.93
Total	169	126	289	

La dernière étape pour le calcul de la conformité utilise les résultats de validation de la sous-classe descriptive du tableau 5.9. Quatre éléments ont été vérifiés dans ce tableau, soit un pour chaque processus d'affaires. La correspondance avec les réponses B2MML a été établie

pour tous les éléments. Ce dernier pointage est additionné à la somme des S_j de l'étape précédente (289) pour obtenir un pointage final de 293.

$$S = \sum_{m=0}^d z_m + \sum_{j \in A} S_j = 4 + 289 = 293 \quad (5.3)$$

À partir de ce pointage final on peut maintenant calculer la conformité globale de l'ensemble des processus d'affaires, pour les deux modèles objet de la définition, avec l'équation 3.6.

$$C = \frac{S}{d + \sum_{j \in A} (a_j + \sum_{i \in E} e_{ij})} = \frac{293}{(4 + 169 + 126)} = 0.980 \quad (5.4)$$

Le pointage de 0.98 ainsi obtenu indique que tous les éléments modélisés n'ont pu être validés avec succès. Dans ce cas, il est préconisé d'identifier la source du problème afin de l'éliminer, ou à tout le moins, en expliquer la cause. Le cas présenté ici sera discuté dans la synthèse à la fin de ce chapitre.

5.9 Validation de l'ordonnancement de la production

Un requis de segment, comme défini dans la norme ISA-95, peut correspondre à un segment de processus ou à un segment de produit, tout dépend lequel des deux est le plus représentatif pour l'entreprise du point de vue de l'ordonnancement. Pour l'entreprise Z, l'ordonnancement est basé sur le produit. Donc, pour valider les équipements dans la sous-classe exécutable commun pour le PMÉ « assemblage câble », il faut chercher dans les équipements qui sont définis par le produit qui transite par ce PMÉ, soit le câble. Les tableaux ci-dessous présentent les résultats de vérification du PMÉ « Assemblage Câble » (tableau 5.12) et du processus d'affaires « Fabrication du câble » (tableau 5.13). Pour faire cette validation, la requête de production « WO1002 » a été créée dans le système pour la fabrication du produit « Câble ».

Tableau 5.12 PMÉ « Assemblage Câble » dans l'ordonnancement

PMÉ « Assemblage Câble » (i = 1) du processus d'affaires « Fabrication du câble » (j = 4)			
Requête = <i>GetProductionSchedule</i> : WO1002			
Artéfact	Objet ISA-95	Élément recherché (k)	Note (x_{ijk})
<i>Lane</i>	<i>Equipment requirement</i>	Interrogateur optique (1)	1
		OTDR (2)	1
		Pompe MJ (3)	1

Tableau 5.13 Processus d'affaire « fabrication du câble » dans l'ordonnancement

Processus d'affaires « Fabrication du câble » (j = 4)			
Artéfact	Objet ISA-95	Élément recherché (l)	Note (y_{jl})
Événement de départ	<i>Production request</i>	Numéro de production request (1)	1
<i>Pool</i>	<i>Location</i>	Fab. Câble (2)	1
Objet de données (matière)	<i>Material consumed requirement</i>	Array (3)	1
		Capillaire (4)	0
		Jauge (5)	1
Extension d'objet de données de type « spécification de matière »	<i>Material consumed requirement property</i>	Array : numéro de série (6)	1
		Capillaire : Longueur (7)	0
		Capillaire : Type (8)	0
		Jauge : Position (9)	1
		Jauge : Type (10)	1
Objet de données (segment de produit)	<i>Segment requirement</i>	Câble (11)	1
Extension d'objet de données de type « paramètre de segment de produit »	<i>Production parameter</i>	Câble : Type d'embout (12)	1
		Câble : Nombre de points (13)	1
		Câble : Longueur (14)	1
		Câble : Nom du client (15)	1
Extension d'objet de données de type « personnel »	<i>Personnel requirement</i>	Opérateur classe A (16)	1
		Opérateur classe B (17)	1
		Technicien (18)	1
		Ingénieur mécanique (19)	1
		Ingénieur optique (20)	1

Même si le processus de fabrication du câble (figure 5.3) illustre quatre objets de données matière le tableau 5.13 n'en contient que trois (array, capillaire et jauge). Ceci s'explique par le fait que le processus de fabrication du câble passe soit par « Assemblage Jauge » ou par « Assemblage Terminaison », jamais par les deux. Dans le cas de cette requête de production, c'est la jauge qui est requise pour la fabrication du câble. Enfin, l'objet de données matière « Capillaire » a encore une note de « 0 » comme pour la validation de la définition. Ceci s'explique par le simple fait que le système n'a pu ordonner que ce qui a été défini.

5.9.1 Mesure de la conformité

Les résultats obtenus par la validation du PMÉ « Assemblage Câble » pour la validation de l'ordonnancement, permettent de calculer un pointage S_{ij} pour la sous-classe exécutable commun. Le tableau 5.12, totalise trois équipements (e_{ij}) qui ont été vérifiés avec succès pour un pointage de 3. Les résultats pour ce PMÉ, sont reportés dans le tableau 5.14. Comme pour l'étape de validation de la définition, les valeurs des cinq autres PMÉ sont montrées à titre d'exemple pour permettre de calculer la conformité dans les autres sous-classes.

Tableau 5.14 Valeurs de e_{ij} et S_{ij} pour le « Fabrication du câble »

Processus d'affaires (j)	PMÉ (i)	e_{ij}	S_{ij}	$C_{ij} = \frac{S_{ij}}{e_{ij}}$
Fabrication du câble (4)	Assemblage câble (1)	3	3	1.00
	Cuisson (2)	1	1	1.00
	Assemblage Jauge (3)	2	2	1.00
	Assemblage terminaison (4)	2	2	1.00
	Étalonnage (5)	4	4	1.00
	Mesure Qualité (6)	3	3	1.00
Total		15	15	—

Pour sa part, le tableau de la sous-classe analytique (tableau 5.13) totalise en tout 20 éléments à valider (a_j), dont 17 ($\sum_{l=1}^{a_j} y_{jl}$) qui ont trouvé une correspondance dans les réponses B2MML. Le pointage pour cette sous-classe (S_j) est de 32. Ces valeurs et le calcul de conformité C_j sont rapportés dans le tableau 5.15. Encore une fois, les valeurs pour les trois autres processus d'affaires du site St-Laurent sont montrées à titre d'exemple pour permettre de calculer la conformité au niveau de la sous-classe descriptive.

$$S_j = \sum_{l=1}^{a_j} y_{jl} + \sum_{i \in E} S_{ij} = 17 + 15 = 32 \quad (5.5)$$

Tableau 5.15 Valeurs de a_j et S_j pour les processus d'affaires du site St-Laurent

Processus d'affaires (j)	a_j	$\sum_{i \in E} e_{ij}$	S_j	$C_j = \frac{S_j}{a_j + \sum_{i \in E} e_{ij}}$
Préparation de la fibre (1)	6	4	10	1.00
Fabrication array (2)	22	26	48	1.00
Fabrication jauge de pression (3)	12	18	30	1.00
Fabrication du câble (4)	20	15	32	0.91
Total	60	63	120	—————

Tel qu'expliqué au chapitre 4, il n'y a pas d'éléments à valider dans la sous-classe descriptive lorsque l'ordonnancement est fait pour les produits. Ce qui fait que le terme $\sum_{m=0}^d z_m$ de l'équation 3.3 est égal à zéro et que le pointage S devient simplement la sommation des pointages des autres étapes de validation.

$$S = \sum_{m=0}^d z_m + \sum_{j \in A} S_j = 0 + 120 = 120 \quad (5.6)$$

À partir de ce pointage final, la conformité globale de l'ensemble des processus d'affaires, pour l'ordonnancement de la production est de 0.976.

$$C = \frac{S}{d + \sum_{j \in A} (a_j + \sum_{i \in E} e_{ij})} = \frac{120}{(60 + 63)} = 0.976 \quad (5.7)$$

5.10 Validation de la performance de la production

La dernière étape de validation est celle du point de vue de la performance de la production. Pour réaliser cette étape, il faut que le MES ait été utilisé réellement dans l'environnement de production. Donc, les résultats récoltés sont issus de l'exécution de la requête de production « WO1002 » dans les installations de l'entreprise Z. Le tableau 5.16 présente les résultats de validation de la sous-classe exécutable commun, le tableau 5.17 une partie de ceux de la sous-classe analytique – le tableau complet est en annexe (Tableau-A III-5) – et le tableau 5.18 ceux de la sous-classe descriptive.

Tableau 5.16 PMÉ « Assemblage Câble » dans la performance

PMÉ « Assemblage Câble » (i = 1) du processus d'affaires « Fabrication du câble » (j = 4)			
Requête = Get ProductionPerformance : WO1002			
Artéfact	Objet ISA-95	Élément recherché (k)	Note (x_{ijk})
Lane	Equipment actual	Interrogateur optique (1)	1
		OTDR (2)	1
		Pompe MJ (3)	1

Tableau 5.17 Processus d'affaires « Fabrication du câble » dans la performance

Processus d'affaires « Fabrication du câble » (j = 4)				
Segment response	Artéfact	Objet ISA-95	Élément recherché (l)	Note (y _{jl})
Assemblage câble	s.o.	Événement de départ	<i>Production response</i>	Câble (1)
	<i>Lane</i>	<i>Location</i>	Ass. Cable (2)	1
	Activité	<i>Segment response</i>	Assemblage câble (3)	1
	Extension d'activité de type « paramètre de processus »	<i>Production data</i>	Pression (4)	1
			Acquisition finale (5)	1
			Mesure OTDR finale (6)	1
			Mesure spectrale finale (7)	1
	Extension d'activité de type « personnel »	<i>Personnel actual</i>	Opérateur classe B (8)	1
	Objet de données (matière)	<i>Material consumed actual</i>	Array (9)	1
			Capillaire (10)	0
	Extension d'objet de données de type « spécification de matière »	<i>Material consumed actual property</i>	Array : Longueur mesurée (11)	1
			Capillaire : Longueur mesurée (12)	0
	Objet de données (segment de produit)	<i>Material produced actual</i>	Câble (13)	1
	Extension d'objet de données de type « paramètre de segment de produit »	<i>Material produced actual property</i>	Mesure OTDR (14)	1

Tableau 5.18 Ensemble des processus d'affaires pour le site St-Laurent

Processus d'affaires du site St-Laurent			
Artéfact	Objet ISA-95	Élément recherché (m)	Note (z _m)
Sous-processus	<i>Process segment</i>	Préparation de la fibre (1)	1
		Fabrication array (2)	1
		Fabrication jauge de pression (3)	1
		Fabrication du câble (4)	1

5.10.1 Mesure de la conformité

Les résultats obtenus par la validation du PMÉ « Assemblage Câble » et du processus d'affaires « Fabrication du câble » au niveau de la performance de la production permettent de mesurer la conformité pour cette étape de validation. Le tableau ci-dessous présente les résultats pour ce PMÉ.

Tableau 5.19 Valeurs de e_{ij} et S_{ij} pour le « Fabrication du câble »

Processus d'affaires (j)	PMÉ (i)	e_{ij}	S_{ij}	$C_{ij} = \frac{S_{ij}}{e_{ij}}$
Fabrication du câble (4)	Assemblage Câble (1)	3	3	1.00
	Cuisson (2)	1	1	1.00
	Assemblage Jauge (3)	2	2	1.00
	Assemblage Terminaison (4)	2	2	1.00
	Étalonnage (5)	4	4	1.00
	Mesure Qualité (6)	3	3	1.00
Total		15	15	_____

Pour sa part, le processus d'affaires « Fabrication du Câble » totalise 51 éléments à valider (a_j), dont 49 ($\sum_{l=1}^{a_j} y_{jl}$) ont trouvé une correspondance dans les réponses B2MML. Le pointage (S_j) pour ce processus d'affaires est de 64 et comme pour les validations précédentes, les valeurs pour les trois autres processus d'affaires du site St-Laurent sont montrées à titre d'exemple pour permettre de calculer la conformité au niveau de la sous-classe descriptive (tableau 5.20).

$$S_j = \sum_{l=1}^{a_j} y_{jl} + \sum_{i \in E} S_{ij} = 49 + 15 = 64 \quad (5.8)$$

Tableau 5.20 Valeurs de a_j et S_j pour les processus d'affaires du site St-Laurent

Processus d'affaires (j)	a_j	$\sum_{i \in E} e_{ij}$	S_j	$C_j = \frac{S_j}{a_j + \sum_{i \in E} e_{ij}}$
Préparation de la fibre (1)	25	2	27	1.00
Fabrication array (2)	62	13	75	1.00
Fabrication jauge de pression (3)	42	9	51	1.00
Fabrication du câble (4)	51	15	64	0.97
Total	180	39	217	

Enfin, avec le pointage de 4 pour la correspondance avec les quatre processus d'affaires (tableau 5.18) et la somme des valeurs de S_j , on obtient un pointage final de 221 pour la validation du point de vue de la performance.

$$S = \sum_{m=0}^d z_m + \sum_{j \in A} S_j = 4 + 217 = 221 \quad (5.9)$$

À partir de ce pointage final, la conformité globale de l'ensemble des processus d'affaires, pour la performance de la production est de 0.991.

$$C = \frac{S}{d + \sum_{j \in A} (a_j + \sum_{i \in E} e_{ij})} = \frac{221}{(4 + 180 + 39)} = 0.991 \quad (5.10)$$

5.11 Synthèse

Le tableau 5.21 fait la synthèse des mesures de conformité obtenues à chaque étape de la validation. On peut observer que pour le processus d'affaires « Fabrication du câble », qui est le processus d'affaires pour lequel les correspondances (C_j) ont été vérifiées en détail, que les

validations varient entre 0.91 et 0.97. Ces chiffres indiquent qu'il y a une différence entre ce qui est modélisé dans les diagrammes BPMN et ce qui est réellement dans le MES.

Tableau 5.21 Synthèse des mesures de conformité

Point de vue	Processus d'affaires (j)	C_j	C
Définition	Préparation de la fibre (1)	1.00	0.980
	Fabrication array (2)	1.00	
	Fabrication jauge de pression (3)	1.00	
	Fabrication du câble (4)	0.93	
Ordonnancement	Préparation de la fibre (1)	1.00	0.976
	Fabrication array (2)	1.00	
	Fabrication jauge de pression (3)	1.00	
	Fabrication du câble (4)	0.91	
Performance	Préparation de la fibre (1)	1.00	0.991
	Fabrication array (2)	1.00	
	Fabrication jauge de pression (3)	1.00	
	Fabrication du câble (4)	0.97	

En regardant de plus près les tableaux 5.6, 5.8, 5.13 et 5.17, la source de ces erreurs a été identifiée comme venant de l'absence de l'objet de type matière « Capillaire » et de ses paramètres dans la définition du produit « Câble » et du segment de processus « Assemblage Câble ». L'absence de cette matière a ensuite eu des répercussions aux étapes suivantes. En effet, le système ne peut pas faire l'ordonnancement d'une matière qui n'est pas définie, pas plus que d'en enregistrer des résultats. La recommandation dans ce cas précis serait de corriger la discordance au niveau de la définition et de refaire les validations pour s'assurer que d'autres éléments ne font pas défaut.

5.12 Conclusion

Ce chapitre a permis d'utiliser la démarche d'intégration avec un cas réel d'intégration dans une entreprise manufacturière. Ainsi, avec la collaboration des ressources clés de l'entreprise Z, il a été possible de documenter le processus d'affaires « Fabrication du câble ». Au tout début du projet, les fonctions de l'entreprise et le modèle physique de l'entreprise à inclure dans le projet ont été identifiés. Cette étape a permis de bien définir la portée du projet de mise en place d'un MES. À partir de ces éléments identifiés, il a été possible de procéder à la modélisation du processus d'affaires « Fabrication du câble » et de tous les PMÉ qu'il contient. Pour la modélisation dans la sous-classe descriptive, c'est le personnel de gestion qui a été le plus sollicité, dans la modélisation de la sous-classe analytique, ce sont les employés responsables de l'exécution de la production, et enfin, pour la modélisation dans la sous-classe d'exécutable commun, ce sont les employés directement impliqués dans la production, dans les applications d'automatisation des processus et dans la création d'instructions de travail. La modélisation sur trois niveaux a donc permis une utilisation adaptée des ressources clés en utilisant de façon ciblée les compétences des différents intervenants.

À partir des modèles, il a été possible de faire l'intégration du MES et de procéder à la validation. Cette validation a été faite de trois points de vue différents, soit la définition, l'ordonnancement et la performance. La validation a permis de quantifier le degré de concordance entre les modèles et le MES.

CONCLUSION GÉNÉRALE

Toutes les entreprises souhaitent que leurs activités de production soient les plus efficaces possible pour évoluer dans des marchés en constante évolution et où l'innovation et la compétitivité sont la clé de la longévité. Au cours des vingt-cinq dernières années, le nombre d'entreprises manufacturières utilisant un MES n'a cessé d'augmenter, mais force est de constater que plusieurs entreprises n'ont pas encore fait le saut ou que des projets d'implantation sont parfois catastrophiques et couteux.

La contribution principale de ce projet de recherche est de proposer un modèle conceptuel afin de modéliser les processus d'une entreprise manufacturière en utilisant la notation BPMN et la norme ISA-95 et ainsi, proposer une démarche structurée pour faire l'analyse systématique des besoins en MES à partir du modèle d'entreprise en accord avec le modèle d'activité et les modèles d'intégration de la norme ISA-95. Plus précisément, la méthode proposée repose sur trois objectifs spécifiques qui sont :

- Créer des liens entre la norme ISA-95 et un modèle de notation déjà reconnue dans l'industrie pour identifier les éléments nécessaires à la mise en place d'un MES et modéliser un processus d'affaires destiné à la fabrication d'un produit.
- Créer une méthode de vérification du cycle d'intégration pour valider le nouveau système mis en place en utilisant les messages B2MML d'ISA-95.
- Créer une méthode pour quantifier la conformité entre les processus d'affaires modélisés et les éléments validés en utilisant les messages B2MML.

L'exécution de la démarche d'intégration dans un cas réel a permis d'identifier les forces et les faiblesses de la démarche et du modèle conceptuel. Les sections qui suivent discutent des découvertes et des difficultés rencontrées tout au long du projet de recherche. Dans un premier temps, les résultats obtenus par rapport aux objectifs spécifiques identifiés dans la problématique sont mis en perspective en abordant les sujets de l'identification, de la modélisation et de la validation. Dans un deuxième temps, les difficultés rencontrées

concernant l'utilisation des messages B2MML et les solutions élaborées pour mener le projet à terme sont discutées et dans un troisième temps, les problèmes reliés à l'utilisation de modèle visuel pour documenter des processus sont abordés. Enfin, à partir de l'expérience acquise durant le projet, des idées de travaux futures sont présentées.

Identification des équipements

L'identification des équipements selon le modèle de hiérarchie des équipements a permis de bien définir les équipements devant faire partie de l'intégration pour le processus d'affaires. D'une part, cette étape a contribué à l'entreprise pour définir précisément chacun des équipements utilisés dans les différents PMÉ. Il est important de rappeler que la notion d'équipement dans la hiérarchie des équipements à une définition qui englobe autant le simple équipement (machine, robot, instrument, etc.) qu'un regroupement logique d'équipement défini par l'entreprise, incluant les sites, les *areas* et l'entreprise elle-même. Donc, au-delà de l'identification du simple équipement, l'exercice a permis aux responsables de l'entreprise de déterminer formellement et précisément les frontières entre les différents *areas*. D'autres parts, l'information recueillie lors de cette étape s'est révélée très utile quand est venu le temps de définir la structure de l'entreprise dans les MES. Des trois MES utilisés dans l'évaluation de la démarche, tous contenaient un module nécessitant une définition physique et hiérarchique de l'entreprise correspondant à la hiérarchie des équipements d'ISA-95. Dans ces trois cas, la configuration de ce module s'est faite de façon simple et directe.

Modélisation des processus

L'utilisation de la démarche d'intégration s'est avérée efficace pour faire la modélisation d'un processus d'affaires. En effet, les trois niveaux de modélisation, avec un niveau de détail bien aligné avec la hiérarchie des fonctions de l'entreprise, ont facilité la collaboration de personnes de disciplines différentes et permis de documenter avec justesse tous les éléments nécessaires à l'exécution des processus d'affaires. Cette méthode de type zoom avant – en anglais, *drill-down* – sur trois niveaux a permis de modéliser des processus

complexes en utilisant un nombre d'artéfacts réduit sur chacun des diagrammes. De plus, l'alignement de chaque élément des diagrammes avec les modèles objets de la norme ISA-95 a facilité la validation des éléments configurés dans le MES. Là où la méthode a été la moins efficace, c'est lors de la configuration des processus dans le MES. Puisque les MES ne suivent pas exactement la norme, il faut prendre le temps de bien comprendre chacun des systèmes pour les configurer adéquatement. Des trois MES utilisés pour valider la méthode, la configuration du système développé selon les modèles objet a été plus facile à faire que pour les deux MES commerciaux, puisque les liens entre le modèle et le système étaient directs.

Validation

L'étape de validation a effectivement permis de quantifier la correspondance entre les processus modélisés et le MES. En utilisant les messages B2MML, les éléments identifiés dans les modèles ont pu être validés un à un et pour trois points de vue différents, soit la définition, l'ordonnancement et la performance. Cependant, cette validation n'a pu être complétée que pour le système développé spécialement dans le cadre de ce projet de recherche. Dans le cas des MES commerciaux, le premier ne supportait pas le format B2MML – contrairement à ses spécifications – et le deuxième ne supportait pas le modèle de « performance de la production ».

Enfin, le processus de validation telle qu'il a été exécuté dans ce mémoire a nécessité beaucoup de manipulation et d'interprétation de messages XML. En effet, ces tâches exigent de la personne qui fait la validation beaucoup de temps et une connaissance approfondie du langage XML et des schémas B2MML. Quelques pistes de solution sont discutées à la fin de ce chapitre pour répondre à cette problématique.

Disponibilité des systèmes compatibles B2MML

La validation de la méthode à partir d'un cas réel dans un MES commercial a permis de réaliser qu'il y a encore du travail à faire pour que les éditeurs de MES intègrent simplement

et naturellement la norme dans leur système. La plupart des éditeurs de MES de grandes envergures font la promotion, dans leurs documents de marketing, de fonctionnalité compatible avec la norme ISA-95 et au document B2MML. Cependant, lorsque vient le temps d'appliquer ces concepts dans un cas réel, il est parfois difficile de trouver l'information pertinente pour réaliser des requêtes selon le format B2MML. Les connecteurs personnalisés sont malheureusement encore privilégiés pour certains éditeurs.

C'est ce qui est arrivé avec le premier MES commercial sélectionné pour faire la validation de la démarche. Beaucoup d'énergie a été déployée pour mettre en place ce système et finalement découvrir que la validation de la méthodologie n'était pas possible avec le système sans y apporter des modifications majeures. Un système a donc été développé pour faire la validation de la méthodologie puisque le premier système sélectionné n'était pas réellement compatible avec B2MML. La validation de la démarche a donc été réalisée avec ce système maison.

À la toute fin, un deuxième système commercial a pu être installé et configuré avec les processus à valider. Ce système avait des références à la norme ISA-95 et à B2MML beaucoup plus détaillées. Le système a été configuré en utilisant la démarche d'intégration, mais la validation n'a pas été complétée avec ce système.

Les modèles visuels versus les non-visuels

Le domaine du génie logiciel a contribué au développement d'outils visuels pour faire la modélisation de situation, de processus et d'architecture. UML est un des nombreux exemples de ce type d'outils. Beaucoup de travaux existent dans ce domaine et au fil du temps, l'utilisation de ces outils est devenue incontournable pour bon nombre de personnes œuvrant dans le domaine du logiciel ou des TI. Cependant, il en est autrement pour le domaine du génie industriel et la documentation des processus d'affaires. Plusieurs ouvrages, sans en faire une règle absolue, font la promotion d'un processus d'analyse de forme non

visuelle composé de tableaux, de listes et de paragraphes pour décrire les processus, les produits et leurs interactions - Scholten (2007) est un bon exemple de méthode non visuelle.

Les travaux et les entrevues faits dans le cadre de ce mémoire ont mené à des constatations du même type pour le milieu manufacturier. Des entreprises certifiées ISO-9001, donc considérées bien documentées, utilisent beaucoup la forme non visuelle pour documenter leurs processus. Que ce soit des instructions de travail, des procédures d'opération normalisées ou des définitions de processus, l'utilisation de forme visuelle est peu présente, et lorsqu'elle l'est, ne suit bien souvent aucun modèle de notation visuel reconnu. Ce qui fait que l'utilisation d'une méthode essentiellement basée sur des artefacts visuels rencontre nécessairement une certaine réticence dans certaines entreprises manufacturières. Une réticence causée par plusieurs facteurs. Les intervenants dans le milieu manufacturier, des opérateurs aux ingénieurs en passant par les gestionnaires, n'ont pas nécessairement une formation qui met l'accent sur ce type d'outil et n'ont souvent pas les connaissances pour utiliser un type de diagramme en particulier. De surcroit, les entreprises qui ont déjà des quantités impressionnantes de documentation dans une forme non visuelle ne souhaitent pas refaire en entier tous ces documents. Tous ces facteurs ont un rôle à jouer dans l'adoption d'une méthode comme celle proposée dans ce mémoire.

Travaux futurs

Comme discuté précédemment, le processus de validation nécessite beaucoup de manipulation et d'interprétation de messages XML. Mais puisque les liens entre les éléments du modèle et l'information contenue dans les messages sont systématiques, une plateforme de modélisation BPMN contenant des fonctions de validation pourrait être développée pour faire cette étape de façon automatisée. En d'autres termes, chacun des éléments BPMN – incluant les extensions – pourrait s'autoévaluer en questionnant le MES avec des messages de type « *GET* » et faire le lien avec les informations contenues dans le message de type « *SHOW* ».

Dans la même suite d'idées, des travaux futurs pourraient être faits pour utiliser la norme B2MML pour configurer automatiquement le MES à l'aide de messages. Ainsi, la méthode pourrait proposer d'utiliser les messages de type « *SYNC ADD* », « *SYNC CHANGE* » et « *SYNC DELETE* » pour configurer directement le MES. Il serait particulièrement intéressant de voir à quel point un MES peut réellement être configuré en utilisant uniquement des messages B2MML.

ANNEXE I

ISA-95

À ce jour, la norme ISA-95 est composée de six parties couvrant la terminologie, les modèles de gestion des opérations manufacturières et l'aspect transactionnel entre les différents systèmes d'information de l'entreprise. Le premier modèle proposé par la norme est le modèle de hiérarchie des fonctions de l'entreprise (Figure-A I-1). Ce modèle identifie et met en perspective les fonctions de l'entreprise les unes par rapport aux autres sans toutefois nommer les systèmes d'information qui sont associés à chacune des fonctions. Dans les faits, le niveau 4 est associé au ERP, le niveau 3 au MES, les niveaux 2 et 1 aux PCS et finalement le niveau 0 au processus lui-même. La partie 1 et 2 de la norme s'intéresse tout particulièrement à l'interface entre les niveaux 3 et 4.

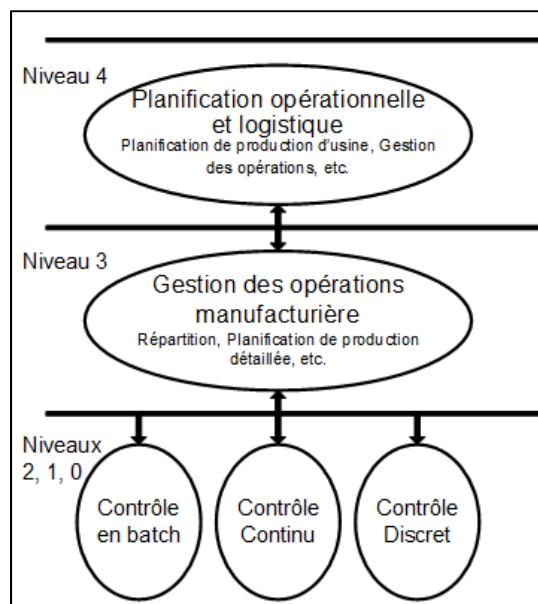


Figure-A I-1 Modèle de hiérarchie des fonctions
Inspiré d'ISA-95 (2000)

De façon générale, les actifs physiques d'une entreprise sont organisés de façon hiérarchique. Cette organisation a un effet sur la façon dont l'information circule. Le modèle hiérarchique

des équipements (Figure-A I-2) définit quelques un de ces actifs physiques impliqués dans l'échange d'information. L'entreprise, qui se situe seule au sommet de la hiérarchie est composée d'au moins un site. Un site est un groupe logique, géographique ou physique déterminé par l'entreprise. Chaque site peut contenir des *areas* représentant aussi un groupe déterminé par l'entreprise. Les cellules de production, les unités de production, les lignes de production et la zone d'entreposage sont quant à eux les niveaux d'équipement les plus bas généralement ordonnancés par le niveau 4 et le niveau 3. Ces derniers, appelés postes de charge se définissent selon l'Office québécois de la langue française comme une unité de production consistant en un ou plusieurs postes de travail définis aux fins de la planification des besoins en capacité et de l'ordonnancement détaillé.

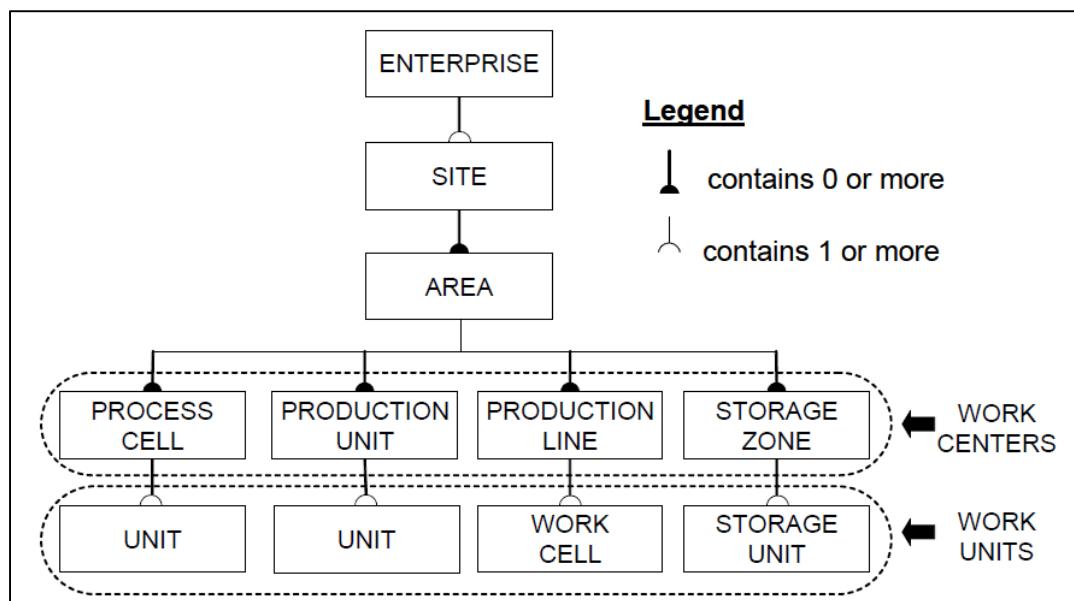


Figure-A I-2 Modèle hiérarchique des équipements

Tiré d'ISA-95 (2005)

Le modèle fonctionnel entreprise-contrôle (Figure-A I-3) définit les fonctions que l'on retrouve au sein de l'entreprise manufacturière. Le modèle identifie dix fonctions reliées directement aux activités de production, et deux fonctions reliées indirectement. Cette figure illustre toutes les fonctions et leurs interactions. La large ligne pointillée représente la limite

entre le niveau de planification opérationnelle (niveau 4) et la gestion des opérations (niveau 3).

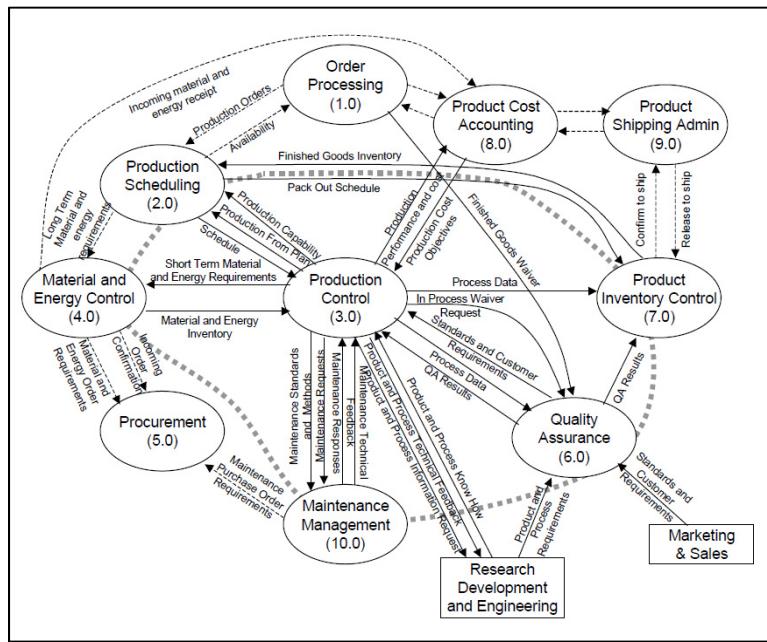


Figure-A I-3 Modèle fonctionnel entreprise-contrôle

Tiré d'ISA-95 (2000)

La norme contient plus de 50 objets regroupés en 9 modèles. Ces objets et leurs attributs permettent de supporter toutes les fonctions reliées à la production. À la base il y a les **modèles matière, équipement et personnel**. Ces modèles sont les ressources nécessaires à la mise en œuvre de la production et sont utilisés par tous les autres modèles.

Le modèle de **segment de processus** (process segment) représente les activités de transformation et de manipulation nécessaires à la fabrication d'un produit, d'un semi-produit ou d'une activité de maintenance. En d'autres termes, ce sont les sous-processus. Chaque sous-processus contient l'information sur les ressources et les spécifications nécessaires à sa réalisation. La **définition de produit** (Product definition information) quant à elle, est composée notamment de segment de produit. Chacun de ces segments représente soit un produit fini ou un produit semi-fini. En plus de contenir les paramètres du produit, le modèle

contient les ressources nécessaires pour sa fabrication. Ensemble, les modèles de définition de produit et de segment de processus contiennent toute l'information nécessaire à l'exécution de la fabrication dans un environnement où les ressources seraient illimitées.

C'est dans ce contexte que les **modèles de capacité des segments de processus** (process segment capability) et de **capacité de production** (production capability) interviennent. Le premier représente la conjonction des capacités de toutes les ressources disponibles pour l'exécution d'un processus en particulier (Figure-A I-4) alors que le second définit la capacité actuelle en tenant compte de l'ordonnancement réel, de la disponibilité des ressources et des limites de capacité de l'usine.

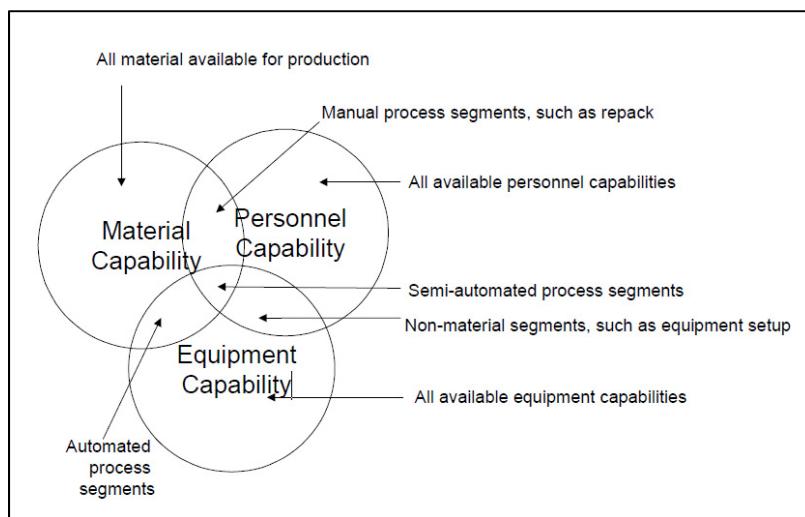


Figure-A I-4 Capacité des segments de processus

Tiré d'ISA-95 (2000)

C'est en partie avec les modèles de capacité que le modèle d'**ordonnancement de la production** (production scheduling) peut être mis en œuvre. En effet, le modèle d'ordonnancement de la production contient toutes les informations d'une requête de production, telles les dates de début et de fin prévues, certaines spécifications particulières à la requête de production et les ressources qui devront être utilisées.

Finalement, le **modèle de performance de la production** (production performance) ferme la boucle avec ses objets permettant d'enregistrer toutes les données de production pertinentes. En plus de permettre la traçabilité par numéro de série ou par lot, les données récoltées permettront de mettre à jour tous les autres modèles à partir de données réelles.

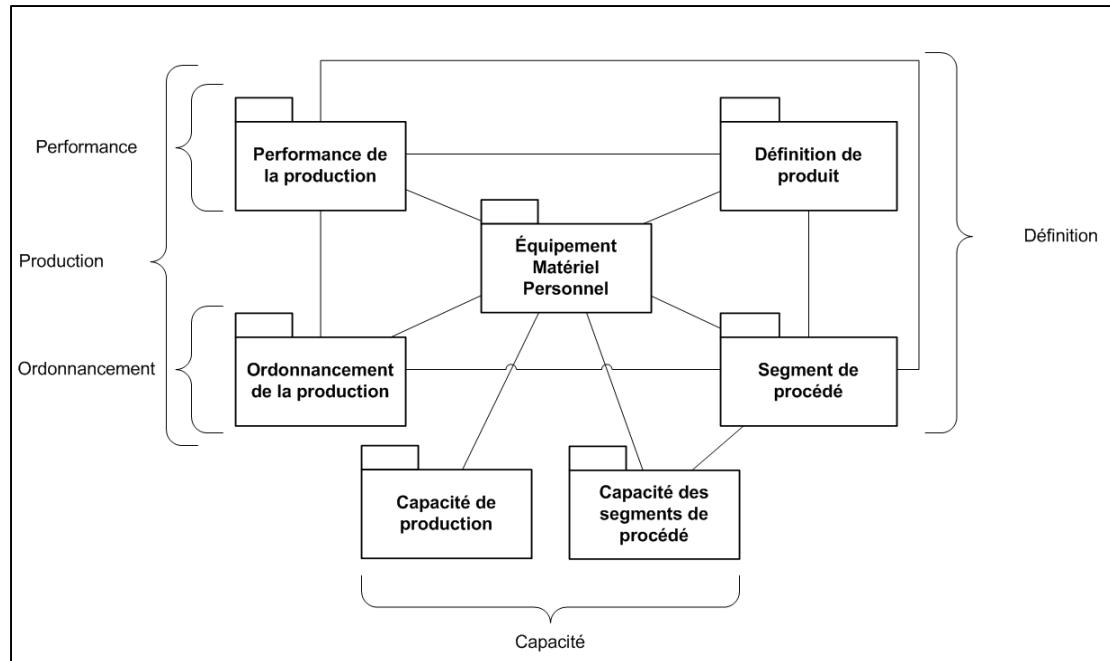


Figure-A I-5 Interaction entre les modèles objets de la norme ISA-95

La troisième partie de la norme ISA-95 s'intéresse aux modèles d'activités de la gestion des opérations manufacturières – En anglais, manufacturing operation management (MOM). Ce concept sépare les activités supportées par le MES en quatre grandes catégories de gestion des opérations : la production, l'entretien, la qualité et l'inventaire. Dans chacune de ces catégories se retrouvent les huit activités du modèle d'activité de la gestion des opérations manufacturières (Figure-A I-6).

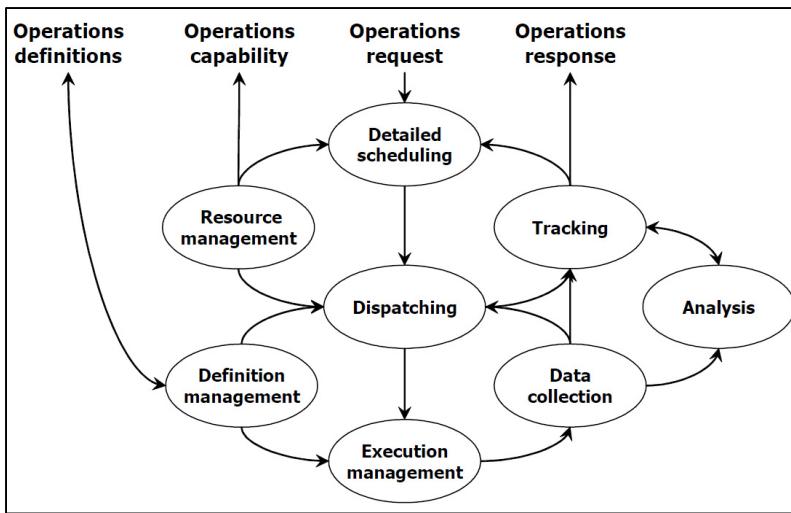


Figure-A I-6 Modèle d'activité générique de la gestion des opérations manufacturières

Tiré d'ISA-95 (2005)

De façon générale, la gestion des opérations doit être définie comme l'ensemble des activités qui coordonnent, dirigent et suit les fonctions spécifiques à chaque catégorie d'opération. Par exemple, selon la partie 3 d'ISA-95 (ISA-95, 2005), les fonctions de gestion des opérations de production utilisent des matières premières, de l'énergie, de l'équipement, du personnel et de l'information pour la fabrication de produit avec les bons coûts, la bonne qualité, la bonne quantité, au bon moment et avec la sécurité requise alors que les fonctions de gestion de la maintenance maintiennent l'équipement, les outils et les actifs connexes, pour assurer leurs disponibilités pour la production en plus d'assurer l'ordonnancement pour la maintenance réactive, périodique, préventive ou proactive.

ANNEXE II

BPMN 2.0

Le but de BPMN est de fournir une notation facile à lire et à comprendre par tous les types d'utilisateur impliqué dans la description et la définition de processus d'affaires. Le chapitre suivant résume les grandes lignes de cet outil de notation.

Éléments de base et extensibilité

BPMN 2.0 introduit le mécanisme d'extensibilité qui permet de bonifier les éléments de la norme BPMN avec des éléments et des attributs additionnels. Ces artefacts peuvent être utilisés pour satisfaire des besoins spécifiques, tels des requis particuliers. Les éléments d'extension ne doivent pas contredire la sémantique d'aucun élément du BPMN. De plus, les diagrammes doivent garder l'aspect et la convivialité du BPMN pour que les diagrammes soient compréhensibles par n'importe quels utilisateurs. Les empreintes des éléments de base ne doivent pas être altérées. Les catégories de base et les éléments sont présentés dans le Tableau-A II-1 et le diagramme de la classe d'extension à la Figure-A II-1.

Selon BPMN 2.0, les artefacts sont utilisés pour apporter de l'information supplémentaire sur le processus et n'importe quels autres artefacts peuvent être utilisés au besoin. L'utilisation de couleur de remplissage et également permise pourvu que les règles suivantes soient respectées :

- Un événement lanceur (throwing event) doit être de couleur foncée;
- Dans une tâche chorégraphie et sous-chorégraphie, une bande participant, qui n'est pas l'initiateur de l'activité, doit avoir un remplissage clair.

Tableau-A II-1 Catégorie et éléments de base du BPMN

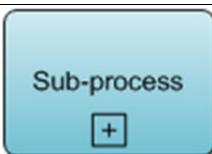
Catégorie	Élément	Notation
Objets de flux	Événement	
	Activité ou tâche	
	Sous-processus	
	Passerelle	
Données	Objets de données	 Data Object
	Données entrantes	 Data Object
	Données sortantes	 Data Object
	Magasin de données	 Data Store

Tableau-A II-1 Catégorie et éléments de base du BPMN (suite)

Catégorie	Élément	Notation
Objets de connexion	Flux de séquence	
	Flux de message	
	Association	
Couloirs	Pool	
	Lane	
Artéfacts	Groupe	
	Annotation	

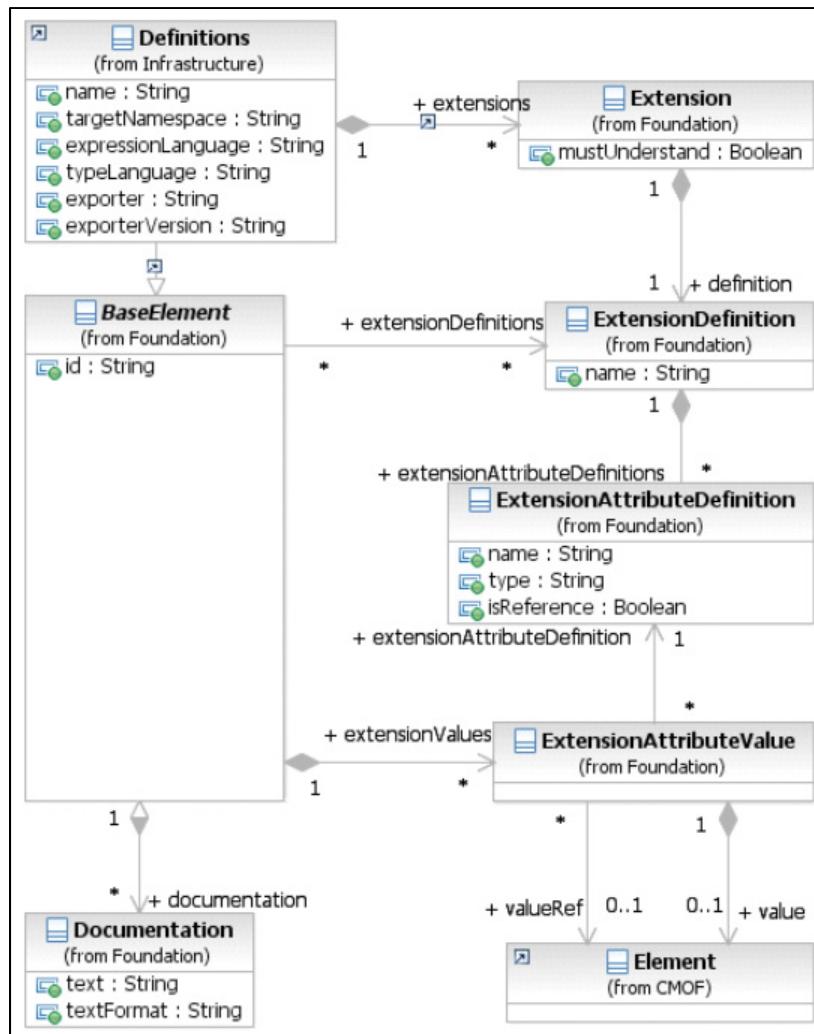


Figure-A II-1 Diagramme de la classe d'extension

Tiré de OMG (2011)

Les sous-classes

La norme BPMN 2.0 (OMG, 2011) définit trois sous-classes à la classe de modélisation complète. Ce sont les classes descriptive, analytique et exécutable commun. La classe descriptive utilise des éléments et des attributs de notations pour la description de processus à haut niveau. La classe analytique contient près de la moitié des éléments de la classe de modélisation complète, dont tous les éléments de la classe descriptive. Cette classe permet la

modélisation des processus avec un plus grand niveau de détail. Enfin la classe d'exécutable commun qui utilise les éléments nécessaires à la modélisation d'exécution de processus.

Les couloirs (swimlanes)

Les couloirs sont représentés par des *pools* et des *lanes*. En plus d'être une représentation graphique du participant lorsqu'utilisé avec le sous-modèle collaboration, le *pool* peu aussi agir comme une *Lane* pour faire le partitionnement des activités avec d'autres *pools*, notamment dans un contexte de *business to business (B2B)*. Selon la norme BPMN 2.0, un *pool* peut avoir des détails internes, sous forme de processus à être exécutés, ou n'avoir aucun détail interne et agir en tant que boîte noire. Dans ce mémoire, les termes *pool* et *Lane* sont utilisés en anglais puisqu'aucune traduction satisfaisante n'a été trouvée pour représenter de façon claire ces concepts.

Une « Lane » est une sous-partition d'un processus qui est utilisée pour l'organisation ou la catégorisation des activités à l'intérieur d'un « pool » ou d'une autre *Lane*. BPMN ne spécifie pas l'utilisation des *lanes* à savoir si elle définit un département de l'entreprise, un système ou un rôle.

Les sous-modèles

BPMN définit trois types de sous modèles pour la modélisation de processus complet : le processus d'orchestration, la collaboration et la chorégraphie.

Selon la norme BPMN 2.0 (OMG, 2011), le processus d'orchestration décrit une séquence d'activité dans une organisation avec l'objectif d'effectuer un travail. Ce processus est représenté par des éléments de flux (activité, événement et passerelle), de données et de connexions. Le processus peut être défini à n'importe quel niveau de l'entreprise et des processus de bas niveau peuvent être regroupés pour représenter un processus de plus haut niveau. Généralement, un processus d'orchestration est représenté dans un seul *pool*.

La collaboration, quant à elle, contient deux pool ou plus représentant chacun un participant. Un participant peut être n'importe quels rôles ou entités indépendants qui dépend d'un autre participant dans l'exécution de son processus. Par exemple, un patient (premier participant indépendant) et un médecin (deuxième participant indépendant) dans un processus de consultation (processus interdépendant). Les messages transmis entre les participants sont représentés par des flux de messages. Dans ce contexte, il n'est pas nécessaire pour un *pool* de contenir un processus.

La chorégraphie est un type de processus dont le but et le comportement diffèrent d'un processus d'orchestration. En mettant l'accent sur l'échange d'informations entre les participants, le processus de chorégraphie, formalise la façon dont les participants coordonnent leurs interactions sous forme de contrat.

ANNEXE III

TABLEAUX DE VALIDATION DE LA DÉMARCHE

Validation de la définition

Tableau-A III-1 PMÉ « Assemblage câble » dans la définition de produit

Lane	Artéfact	Objet ISA-95	Éléments recherché	Correspondance B2MML	Note
Equipment specification	Interrogateur optique		Interrogateur optique	<pre><EquipmentSpecification> <EquipmentClassID>Intérogateur optique</EquipmentClassID> <EquipmentID>SM #1</EquipmentID> <Description>Interrogateur optique</Description> <Quantity> <QuantityString>1</QuantityString> <DataType>double</DataType> <UnitOfMeasure>Unit</UnitOfMeasure> </Quantity> </EquipmentSpecification></pre>	1
			OTDR	<pre><EquipmentSpecification> <EquipmentClassID>OTDR</EquipmentClassID> <Description>OTDR</Description> <Quantity> <QuantityString>1</QuantityString> <DataType>double</DataType> <UnitOfMeasure>Unit</UnitOfMeasure> </Quantity> </EquipmentSpecification></pre>	1
	Pompe MJ			<pre><EquipmentSpecification> <EquipmentClassID>Pompe MJ</EquipmentClassID> <Description>Pompe</Description> <Quantity> <QuantityString>1</QuantityString> <DataType>double</DataType> <UnitOfMeasure>Unit</UnitOfMeasure> </Quantity> </EquipmentSpecification></pre>	1

Tableau-A III-2 Processus d'affaires « Fabrication du câble » – définition de produit

Activité	Process segment	Élément recherché	Correspondance B2MML	Note
Événement	Product production rule	Fab. Cable	<pre data-bbox="440 528 897 612"><ProductDefinition> <ID>Câble</ID> ... <Location>Fab. Cable</Location> ... </ProductDefinition></pre>	1
		Câble	<pre data-bbox="440 654 685 718"><ProductDefinition> <ID>Câble</ID> ... </ProductDefinition></pre>	1
	Assemblage câble	Cuisson	<pre data-bbox="440 844 1207 950"><ProductDefinition> <ID>Câble</ID> ... <ProductSegment> <ID>Câble</ID> ... <ProcessSegmentID>Assemblage Câble</ProcessSegmentID>... </ProductSegment> </ProductDefinition></pre>	1
	Assemblage Jauge	Cuisson	<pre data-bbox="440 950 1093 1056"><ProductDefinition> <ID>Câble</ID> ... <ProductSegment> <ID>Câble</ID> ... <ProcessSegmentID>Cuisson</ProcessSegmentID> ... </ProductSegment> </ProductDefinition></pre>	1
	Assemblage terminaison	Cuisson	<pre data-bbox="440 1056 1207 1161"><ProductDefinition> <ID>Câble</ID> ... <ProductSegment> <ID>Câble</ID> ... <ProcessSegmentID>Assemblage Jauge</ProcessSegmentID>... </ProductSegment> </ProductDefinition></pre>	1
	Étalonnage	Cuisson	<pre data-bbox="440 1161 1158 1267"><ProductDefinition> <ID>Câble</ID> ... <ProductSegment> <ID>Câble</ID> ... <ProcessSegmentID>Assemblage Terminaison</ProcessSegmentID>... </ProductSegment> </ProductDefinition></pre>	1
	Mesure Qualité	Cuisson	<pre data-bbox="440 1267 1158 1372"><ProductDefinition> <ID>Câble</ID> ... <ProductSegment> <ID>Câble</ID> ... <ProcessSegmentID>Étalonnage</ProcessSegmentID> ... </ProductSegment> </ProductDefinition></pre>	1
			<pre data-bbox="440 1372 1175 1478"><ProductDefinition> <ID>Câble</ID> ... <ProductSegment> <ID>Câble</ID> ... <ProcessSegmentID>Mesure Qualité</ProcessSegmentID>... </ProductSegment> </ProductDefinition></pre>	1

Tableau-A III-2 Processus d'affaires « Fabrication du câble » – définition de produit (suite)

Artéfact	Objet ISA-95	Élément recherché	Correspondance B2MML	Note
Objet de données (matière)	Material specification	Array	<pre data-bbox="572 519 1139 720"><MaterialSpecification> <MaterialClassID>Array</MaterialClassID> <Description>Array</Description> <Quantity> <QuantityString>1</QuantityString> <DataType>double</DataType> <UnitOfMeasure>unit</UnitOfMeasure> </Quantity> </MaterialSpecification></pre> <p data-bbox="572 730 633 751">s.o.</p>	1
		Capillaire		0
		Terminaison	<pre data-bbox="572 1110 1217 1117"><MaterialSpecification></pre> <p data-bbox="572 1117 1217 1142" style="background-color: #cccccc;"><MaterialClassID>Terminaison</MaterialClassID></p> <pre data-bbox="572 1142 1106 1167"><Description>Terminaison</Description></pre> <pre data-bbox="572 1167 747 1193"><Quantity></pre> <pre data-bbox="572 1193 1106 1218"><QuantityString>1</QuantityString></pre> <pre data-bbox="572 1218 1106 1243"><DataType>double</DataType></pre> <pre data-bbox="572 1243 1106 1269"><UnitOfMeasure>unit</UnitOfMeasure></pre> <pre data-bbox="572 1269 747 1294"></Quantity></pre> <pre data-bbox="572 1294 894 1320"></MaterialSpecification></pre>	1
Extension d'objet de données de type « spécification de matière »	Material specification	PG	<pre data-bbox="572 1322 1165 1564"><MaterialSpecification> <MaterialClassID>PG</MaterialClassID> <Description>PG</Description> <Quantity> <QuantityString>1</QuantityString> <DataType>double</DataType> <UnitOfMeasure>unit</UnitOfMeasure> </Quantity> </MaterialSpecification></pre>	1
		Array : Nb. points	<pre data-bbox="572 1575 1165 1600"><MaterialSpecification></pre> <p data-bbox="572 1600 1165 1626" style="background-color: #cccccc;"><MaterialClassID>Array</MaterialClassID> ...</p> <pre data-bbox="572 1626 1018 1651"><MaterialSpecificationProperty></pre> <pre data-bbox="572 1651 882 1676"><ID>Longueur</ID></pre> <pre data-bbox="572 1676 747 1702"><Value></pre> <pre data-bbox="572 1702 1106 1727"><ValueString>1500</ValueString></pre> <pre data-bbox="572 1727 1106 1752"><UnitOfMeasure>mètre</UnitOfMeasure></pre> <pre data-bbox="572 1752 747 1778"></Value></pre> <pre data-bbox="572 1778 1034 1803"></MaterialSpecificationProperty></pre> <pre data-bbox="572 1803 894 1828"></MaterialSpecification></pre> <pre data-bbox="572 1617 1165 1643"><MaterialSpecification></pre> <p data-bbox="572 1643 1165 1668" style="background-color: #cccccc;"><MaterialClassID>Array</MaterialClassID> ...</p> <pre data-bbox="572 1668 1018 1693"><MaterialSpecificationProperty></pre> <pre data-bbox="572 1693 882 1719"><ID>Nb. points</ID></pre> <pre data-bbox="572 1719 747 1744"><Value></pre> <pre data-bbox="572 1744 1106 1769"><ValueString>1</ValueString>...</pre> <pre data-bbox="572 1769 747 1795"></Value>...</pre> <pre data-bbox="572 1795 747 1820"><Value></pre> <pre data-bbox="572 1820 1106 1845"><ValueString>40</ValueString> ...</pre> <pre data-bbox="572 1845 747 1871"></Value></pre> <pre data-bbox="572 1871 1051 1896"></MaterialSpecificationProperty></pre> <pre data-bbox="572 1896 894 1921"></MaterialSpecification></pre>	1

Tableau-A III-2 Processus d'affaires « Fabrication du câble » – définition de produit (suite)

Objet de données (segment de produit)	Extension d'objet de données de type « spécification de matière »	Artéfact
Product segment	Material specification	Objet ISA-95
Câble	<p>Terminaision : Matière</p> <pre> <MaterialSpecification> <MaterialClassID>Jauge</MaterialClassID> ... <MaterialSpecificationProperty> <ID>Type</ID> <Value> <ValueString>Type A</ValueString>... </Value>... <Value> <ValueString>Type B</ValueString> ... </Value> </MaterialSpecificationProperty> </MaterialSpecification> <MaterialSpecification> <MaterialClassID>Terminaision</MaterialClassID> ... <MaterialSpecificationProperty> <ID>Matière</ID> <Value> <ValueString>Incoloy 825</ValueString>... </Value>... <Value> <ValueString>Incoloy 625</ValueString> ... </Value> </MaterialSpecificationProperty> </MaterialSpecification></pre>	<p>Élément recherché</p> <p>s.o.</p> <p>s.o.</p> <p>Correspondance B2MML</p>
		Note
		0
		0
		1
		1
		1

Tableau-A III-2 Processus d'affaires « Fabrication du câble » – définition de produit (suite)

Artéfact	Objet ISA-95	Élément recherché	Correspondance B2MML	Note
Extension d'objet de données de type « paramètre de segment de produit »	Product parameter	Câble : Matière du capillaire	<pre data-bbox="580 519 1224 819"><ProductSegment> <ID>Câble</ID> ... <Parameter> <ID>Matière du capillaire</ID> <Value> <ValueString>Incoloy 625</ValueString> ... </Value> <Value> <ValueString>Incoloy 825</ValueString> ... </Value> </Parameter> ... </ProductSegment></pre>	1
Extension d'objet de données de type « personnel »	Personnel specification	Operateur classe B	<pre data-bbox="580 830 1240 1119"><ProductSegment> <ID>Câble</ID> ... <PersonnelSpecification> <PersonnelClassID> Opérateur classe B </PersonnelClassID> <Description>Opérateur classe B</Description> </PersonnelSpecification> ... </ProductSegment></pre>	1

Validation des segments de processus

Tableau-A III-3 Validation du PMÉ « Assemblage Câble »

PMÉ « Assemblage Câble » (i = 1) du processus d'affaires « Fabrication du câble » (j = 4)				
Requête = GetProcessSegment : Assemblage Câble				
Artéfact	Objet ISA-95	Éléments recherchés (k)	Correspondance B2MML	Note (x_{ijk})
Lane	Equipment specification	Interrogateur optique (1)	<pre><EquipmentSegmentSpecification> <EquipmentClassID>Intérogateur optique</EquipmentClassID> <EquipmentID>SM #1</EquipmentID> <Description>Interrogateur optique</Description> <Quantity> <QuantityString>1</QuantityString> <DataType>double</DataType> <UnitOfMeasure>Unit</UnitOfMeasure> </Quantity> </EquipmentSegmentSpecification ></pre>	1
		OTDR (2)	<pre><EquipmentSegmentSpecification > <EquipmentClassID>OTDR</EquipmentClassID> <Description>OTDR</Description> <Quantity> <QuantityString>1</QuantityString> <DataType>double</DataType> <UnitOfMeasure>Unit</UnitOfMeasure> </Quantity> </EquipmentSegmentSpecification ></pre>	1
		Pompe MJ (3)	<pre><EquipmentSegmentSpecification > <EquipmentClassID>Pompe MJ</EquipmentClassID> <Description>Pompe</Description> <Quantity> <QuantityString>1</QuantityString> <DataType>double</DataType> <UnitOfMeasure>Unit</UnitOfMeasure> </Quantity> </EquipmentSegmentSpecification ></pre>	1

Tableau-A III-4 Validation du processus d'affaires « Assemblage Câble »

Processus d'affaires « Fabrication du câble » (j = 4)					
Requête = GetProcessSegment : Assemblage Câble					
	Artéfact	Objet ISA-95	Éléments recherché (1)	Correspondance B2MML	Note (y _{jl})
Extension d'activité de type « personnel »	Extension d'activité de type « paramètre de processus »	Lane	Activité	<pre><ProcessSegment> <ID>Assemblage Câble</ID> ... </ProcessSegment></pre>	1
Personnel segment specification	Process segment parameter	Location	Process segment	<pre><ProcessSegment> <ID>Assemblage Câble</ID> ... <Location> <EquipmentID>Ass. Câble</EquipmentID> <EquipmentElementLevel> WorkCell </EquipmentElementLevel> </Location> ... </ProcessSegment></pre>	1
Opérateur classe B (4)	Débit (3)	Ass. Câble (2)	Assemblage Câble (1)	<pre><ProcessSegment> <ID>Assemblage Câble</ID> ... <Parameter> <ID>Débit</ID> <Value> <ValueString>5</ValueString> <DataType>string</DataType> <UnitOfMeasure>L/h</UnitOfMeasure> </Value> <Description>Débit d'eau</Description> </Parameter> ... </ProcessSegment></pre>	1
				<pre><PersonnelSegmentSpecification> <PersonnelClassID>Opérateur classe B</PersonnelClassID> <Description>Opérateur classe B</Description> <Quantity> <QuantityString>22</QuantityString> <DataType>double</DataType> <UnitOfMeasure>hour</UnitOfMeasure> </Quantity> </PersonnelSegmentSpecification></pre>	1

Tableau-A III-4 Validation du processus d'affaires « Assemblage Câble » (suite)

Processus d'affaires « Fabrication du câble » (j = 4) Requête = GetProcessSegment : Assemblage Câble				
Artéfact	Objet ISA-95	Éléments recherchés (1)	Correspondance B2MML	Note (y_{jl})
Objet de données (matière)	Material segment specification	Capillaire (5)	s.o.	0
Extension d'objet de données de type « spécification de matière »	Material segment specification property	Array (6)	<MaterialSegmentSpecification> <MaterialClassID> Array </MaterialClassID> <Description> Array </Description> <Quantity> <QuantityString> 1 </QuantityString> <DataType> double </DataType> <UnitOfMeasure> unit </UnitOfMeasure> </Quantity> </MaterialSegmentSpecification>	1
		Array : Nb. Points (7)	<MaterialSegmentSpecification> <MaterialClassID> Array </MaterialClassID> ... <MaterialSegmentSpecificationProperty> <ID> Longueur </ID> <Value> <ValueString> 1500 </ValueString> <UnitOfMeasure> mètre </UnitOfMeasure> </Value> </MaterialSegmentSpecificationProperty> </MaterialSegmentSpecification>	1
		Array : Nb. Points (8)	<MaterialSegmentSpecification> <MaterialClassID> Array </MaterialClassID> ... <MaterialSegmentSpecificationProperty> <ID> Nb. points </ID> <Value> <ValueString> 1 </ValueString>... </Value> <Value> <ValueString> 40 </ValueString> ... </Value> </MaterialSegmentSpecificationProperty> </MaterialSegmentSpecification>	1

Tableau-A III-4 Validation du processus d'affaires « Assemblage Câble » (suite)

Processus d'affaires « Fabrication du câble » (j = 4) Requête = GetProcessSegment : Assemblage Câble				
Artéfact	Objet ISA-95	Éléments recherchés (l)	Correspondance B2MML	Note (y_{jl})
Extension d'objet de données de type « spécification de matière »	Material segment specification property	Capillaire : Matière (9)	s.o	0
	Capillaire : Longueur (10)	s.o		0

Validation de la performance de la production

Tableau-A III-5 Processus d'affaires « Fabrication du câble » dans la performance

Processus d'affaires « Fabrication du câble » (j = 4)				
Segment response	Artéfact	Objet ISA-95	Éléments recherchés (l)	Note (y_{jl})
s.o.	Événement de départ	Production response	Câble (1)	1
Assemblage câble	Lane	Location	Ass. Cable (2)	1
	Activité	Segment response	Assemblage câble (3)	1
	Extension d'activité de type « paramètre de processus »	Production data	Pression (4)	1
			Acquisition finale (5)	1
			Mesure OTDR finale (6)	1
			Mesure spectrale finale (7)	1
	Extension d'activité de type « personnel »	Personnel actual	Opérateur classe B (8)	1
	Objet de données (matière)	Material consumed actual	Array (9)	1
			Capillaire (10)	0
	Extension d'objet de données de type « spécification de matière »	Material consumed actual property	Array : Longueur mesurée (11)	1
			Capillaire : Longueur mesurée (12)	0
Cuisson	Objet de données (segment de produit)	Material produced actual	Câble (13)	1
	Extension d'objet de données de type « paramètre de segment de produit »	Material produced actual property	Mesure OTDR (14)	1
	Lane	Location	Cuisson (15)	1
	Activité	Segment response	Cuisson (16)	1
	Extension d'activité de type « paramètre de processus »	Production data	Pointe maximum (17)	1
			Nombre de pointes (18)	1
			Température moyenne (19)	1
			Longueur d'onde moyenne (20)	1
	Extension d'activité de type « personnel »	Personnel actual	Technicien (21)	1
			Opérateur classe A (22)	1
	Objet de données (matière)	Material consumed actual	Câble (23)	1
	Objet de données (segment de produit)	Material produced actual	Câble (24)	1

Tableau-A III-5 Processus d'affaires « Fabrication du câble » dans la performance (suite)

Processus d'affaires « Fabrication du câble » (j = 4)				
Segment response	Artéfact	Objet ISA-95	Éléments recherchés (I)	Note (y_{jl})
Assemblage jauge	Lane	Location	Ass. Tip (25)	1
	Activité	Segment response	Assemblage jauge (26)	1
	Extension d'activité de type « paramètre de processus »	Production data	Mesure spectrale (27)	1
			Vérification de preuve (28)	1
	Extension d'activité de type « personnel »	Personnel actual	Technicien (29)	1
			Ingénieur mécanique (30)	1
Objet de données (matière)	Objet de données (matière)	Material consumed actual	Jauge (31)	1
			Câble (32)	1
	Objet de données (segment de produit)	Material produced actual	Câble (33)	1
Étalonnage	Lane	Location	Étalonnage (34)	1
	Activité	Segment response	Étalonnage (35)	1
	Extension d'activité de type « paramètre de processus »	Production data	Température mesurée (36)	1
			Température calculée (37)	1
			Longueur d'onde (38)	1
	Extension d'activité de type « personnel »	Personnel actual	Opérateur classe B (39)	1
Objet de données (matière)	Objet de données (matière)	Material consumed actual	Câble (40)	1
			Câble (41)	1
	Objet de données (segment de produit)	Material produced actual		
Mesure qualité	Lane	Location	Qualité (42)	1
	Activité	Segment response	Qualité (43)	1
	Extension d'activité de type « paramètre de processus »	Production data	Niveau de bruit (44)	1
			Longueur OTDR (45)	1
			Niveau relatif (46)	1
	Extension d'activité de type « personnel »	Personnel actual	Opérateur classe B (47)	1
			Ingénieur Optique (48)	1
	Objet de données (matière)	Material consumed actual	Câble (49)	1
	Objet de données (segment de produit)	Material produced actual	Câble (50)	1
	Extension d'objet de données de type « paramètre de segment de produit »	Material produced actual property	Câble : Longueur (51)	1

ANNEXE IV

TABLEAU DE LA DÉMARCHE D'INTÉGRATION

Tableau-A IV-1 Validation détaillée pour le processus d'affaires 1

« Processus d'affaire 1 » (j = 1)				
Artéfact	Objet ISA-95	Éléments à rechercher	Correspondance B2MML	Note (y _{ji})
Événement de départ	Production request	Requête de production du produit X (l = 1)	<ProductionRequest> <ID>WO #1</ID> <Description> Requête de production #1 </Description> <ProductProductionRuleID> Produit X </ProductProductionRuleID> ... <ProductionRequest>	1
Pool	Location	<i>Area 1</i> (l = 2)	<ProductionRequest> <ID>WO #1</ID> ... <Location> Area 1 </Location> ... <ProductionRequest>	1
Objet de données (matière)	Material consumed requirement	Mat A (l = 3)	<MaterialRequirement> <MaterialClassID> Mat A </MaterialClassID> <Description> Matière A </Description> <MaterialUse> Consumed </MaterialUse> ... </MaterialRequirement>	1
		Mat B (l = 4)	s.o.	0

Tableau-A IV-1 Validation détaillée pour le processus d'affaires 1 (suite)

« Processus d'affaire 1 » (j = 1)				
Artéfact	Objet ISA-95	Éléments à rechercher	Correspondance B2MML	Note (y_{jl})
Extension d'objet de données de type « spécification de matière »	Material consumed requirement property	MAT A : Paramètre D (l = 5)	<pre> <MaterialRequirement> <MaterialClassID> Mat A </MaterialClassID> <Description> Matière A </Description> <MaterialUse> Consumed </MaterialUse> ... <MaterialRequirementProperty> <Property> <ID>Paramètre D</ID> <Value> <ValueString> 173 </ValueString> </Value> ... </Property> </MaterialRequirementProperty> </MaterialRequirement></pre>	1
Objet de données (segment de produit)	Segment requirement	Pièce A (l = 6)	<pre> <SegmentRequirement> <ID>Pièce A</ID> <ProductSegmentID> Pièce A </ProductSegmentID> <Description> Pièce A </Description> ... </SegmentRequirement></pre>	1
Extension d'objet de données de type « paramètre de segment de produit »	Production parameter	Pièce A : Paramètre B (l = 7)	<pre> <SegmentRequirement> <ID>Pièce A</ID> ... <ProductionParameter> <Parameter> <ID>Paramètre B</ID> <Value> <ValueString> 24 </ValueString> </Value> ... </Parameter> </ProductionParameter> </SegmentRequirement></pre>	1

Tableau-A IV-1 Validation détaillée pour le processus d'affaires 1 (suite)

« Processus d'affaire 1 » (j = 1)				
Artéfact	Objet ISA-95	Éléments à rechercher	Correspondance B2MML	Note (y _j)
		Pièce A : Paramètre C <i>(l = 8)</i>	<pre> <SegmentRequirement> <ID>Pièce A</ID> ... <ProductionParameter> <Parameter> <ID>Paramètre C</ID> <Value> <ValueString> 35 </ValueString> </Value> ... </Parameter> </ProductionParameter> ... </SegmentRequirement></pre>	1
Extension d'objet de données de type « personnel »	Personnel requirement	Pièce A : Opérateur classe A <i>(l = 9)</i>	<pre> <SegmentRequirement> <ID>Pièce A</ID> ... <PersonnelRequirement> <PersonnelClassID> Opérateur classe A </PersonnelClassID> <PersonID> Steve K. </PersonID> <Description> Opérateur classe A </Description> ... </PersonnelRequirement> ... <SegmentRequirement></pre>	1

ANNEXE V

EXAMPLE DE MESSAGE B2MML

Process segment : Assemblage Câble

```
<ShowProcessSegment xmlns="http://www.wbf.org/xml/B2MML-V0401"
  xmlns:Extended="http://www.wbf.org/xml/B2MML-V0401-AllExtensions"
  xmlns:xsi="http://www.w3.org/2001/XMLSchema-instance"
  xsi:schemaLocation="http://www.wbf.org/xml/B2MML-V0401
C:\Users\Eric\Documents\ETS\Projet\B2MML\B2MML-BatchML-V0401-Schema\B2MML-V0401-
ProcessSegment.xsd" releaseID="1.0" versionID="1.0">
  <ApplicationArea>
    <Sender>
      <LogicalID>::1</LogicalID>
      <ComponentID>Atlas</ComponentID>
    </Sender>
    <CreationDateTime>2013-04-23T21:06:33.357</CreationDateTime>
  </ApplicationArea>
  <DataArea>
    <Show>
      <ResponseCriteria/>
    </Show>
    <ProcessSegment>
      <ID>Assemblage Câble</ID>
      <Description>Assemblage de la fibre et du capillaire</Description>
      <Location>
        <EquipmentID>Ass. Câble</EquipmentID>
        <EquipmentElementLevel>WorkCell</EquipmentElementLevel>
      </Location>
      <PublishedDate>2012-06-27T12:40:33</PublishedDate>
      <Duration/>
      <PersonnelSegmentSpecification>
        <PersonnelClassID>Opérateur classe B</PersonnelClassID>
        <Description>Opérateur classe B</Description>
        <Quantity>
          <QuantityString>22</QuantityString>
          <DataType>double</DataType>
          <UnitOfMeasure>hour</UnitOfMeasure>
        </Quantity>
      </PersonnelSegmentSpecification>
      <EquipmentSegmentSpecification>
        <EquipmentClassID>Intérogateur optique</EquipmentClassID>
        <EquipmentID>SM #1</EquipmentID>
        <Description>SM125</Description>
        <Quantity>
          <QuantityString>10</QuantityString>
          <DataType>double</DataType>
          <UnitOfMeasure>minute</UnitOfMeasure>
        </Quantity>
      </EquipmentSegmentSpecification>
      <EquipmentSegmentSpecification>
        <EquipmentClassID>OTDR</EquipmentClassID>
        <EquipmentID>SM #3</EquipmentID>
        <Description>OTDR</Description>
        <Quantity>
          <QuantityString>15</QuantityString>
          <DataType>double</DataType>
          <UnitOfMeasure>minute</UnitOfMeasure>
        </Quantity>
      </EquipmentSegmentSpecification>
      <EquipmentSegmentSpecification>
```

```
<EquipmentClassID>Pompe MJ</EquipmentClassID>
<Description>Pompe MJ</Description>
<Quantity>
    <QuantityString>20</QuantityString>
    <DataType>double</DataType>
    <UnitOfMeasure>hour</UnitOfMeasure>
</Quantity>
</EquipmentSegmentSpecification>
<MaterialSegmentSpecification>
    <MaterialClassID>Capillaire</MaterialClassID>
    <Description>Capillaire</Description>
    <Quantity>
        <QuantityString>1</QuantityString>
        <DataType>double</DataType>
        <UnitOfMeasure>unit</UnitOfMeasure>
    </Quantity>
</MaterialSegmentSpecification>
<MaterialSegmentSpecification>
    <MaterialClassID>Array</MaterialClassID>
    <Description>Array</Description>
    <Quantity>
        <QuantityString>1</QuantityString>
        <DataType>double</DataType>
        <UnitOfMeasure>unit</UnitOfMeasure>
    </Quantity>
</MaterialSegmentSpecification>
<MaterialSegmentSpecification>
    <MaterialClassID>Câble</MaterialClassID>
    <Description>Câble</Description>
    <Quantity>
        <QuantityString>1</QuantityString>
        <DataType>double</DataType>
        <UnitOfMeasure>unit</UnitOfMeasure>
    </Quantity>
</MaterialSegmentSpecification>
<Parameter>
    <ID>Débit</ID>
    <Value>
        <ValueString>5</ValueString>
        <DataType>string</DataType>
        <UnitOfMeasure>L/h</UnitOfMeasure>
    </Value>
    <Value>
        <ValueString>15</ValueString>
        <DataType>string</DataType>
        <UnitOfMeasure>L/h</UnitOfMeasure>
    </Value>
    <Description>Débit d'eau.</Description>
</Parameter>
</ProcessSegment>
</DataArea>
</ShowProcessSegment>
```

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Barry, J., M. Aparicio, T. Durniak, P. Herman, J. Karuturi, C. Woods, C. Gilman, H. Lam et R. Ramnath. 1998. « NIIIP-SMART: an investigation of distributed object approaches to support MES development and deployment in a virtual enterprise ». In *Enterprise Distributed Object Computing Workshop, 1998. EDOC '98. Proceedings. Second International.* (3-5 Nov 1998), p. 366-377.
- Brandl, D. 2002. « Business to manufacturing (B2M) collaboration between business and manufacturing using ISA-95 ». *REE, Revue de L'Electricite et de L'Electronique*, vol. 2002, n° 8, p. 46-52.
- Channabasavaiah, Kishore, Kerrie Holley et Edward M Jr Tuggle. 2004. « Migrating to a service-oriented architecture ». *IBM.*
- Cheng, Fan-Tien, Chih-Feng Chang et Shang-Lun Wu. 2004. « Development of holonic manufacturing execution systems ». *Journal of Intelligent Manufacturing*, vol. 15, n° 2, p. 253-267.
- Cottyn, J., H. Van Landeghem, K. Stockman et S. Derammelaere. 2009. « The combined adoption of production it and strategic initiatives - Initial considerations for a Lean MES analysis ». In *Computers & Industrial Engineering, 2009. CIE 2009. International Conference on.* (6-9 July 2009), p. 1629-1634.
- Cottyn, J., H. Van Landeghem, K. Stockman et S. Derammelaere. 2011. « A method to align a manufacturing execution system with Lean objectives ». *International Journal of Production Research*, vol. 49, n° 14, p. 4397-4413.
- Cottyn, Johannes. 2012. « Design of lean manufacturing execution system framework ». Ghent University, 220 p.
- Cottyn, Johannes, Kurt Stockman et Hendrik Van Landeghem. 2008. « The Complementarity of Lean Thinking and the ISA 95 Standard ». In *WBF 2008 European Conference, Papers and presentations.*
- De Ugarte, B. Saenz, A. Artiba et R. Pellerin. 2009. « Manufacturing execution system - A literature review ». *Production Planning and Control*, vol. 20, n° 6, p. 525-539.
- Diep, D., P. Massotte et A. Meimouni. 2003. « A distributed manufacturing execution system implemented with agents: the PABADIS model ». In *Industrial Informatics, 2003. INDIN 2003. Proceedings. IEEE International Conference on.* (21-24 Aug. 2003), p. 301-306.

- Fei, Luo. 2010. « Manufacturing execution system design and implementation ». In *2010 2nd International Conference on Computer Engineering and Technology, IC CET 2010, April 16, 2010 - April 18, 2010*. (Chengdu, China) Vol. 6, p. V6559-V6562. Coll. « ICCET 2010 - 2010 International Conference on Computer Engineering and Technology, Proceedings »: IEEE Computer Society.
- Georgoudakis, M., C. Alexakos, A. Kalogeras, J. Gialelis et S. Koubias. 2006. « Decentralized Production control through ANSI / ISA-95 ~ based ontology and agents ». In *Factory Communication Systems, 2006 IEEE International Workshop on*. (0-0 0), p. 374-379.
- Hammer, Michael, et James Champy. 1993. *Reengineering the Corporation: A Manifesto for Business Revolution*. 223 p.
- He, Dazhuang, Andrei Lobov et Jose L. Martinez Lastra. 2012. « ISA-95 Tool for Enterprise Modeling ». In *ICONS 2012 : The seventh International Conference on Systems*. (Saint Gilles, Reunion, 29 février au 5 mars 2012), sous la dir. de Copyright (c) IARIA, 2012, p. 83-87.
- Hicks, B. J., S. J. Culley et C. A. McMahon. 2006. « A study of issues relating to information management across engineering SMEs ». *International Journal of Information Management*, vol. 26, n° 4, p. 267-289.
- Hicks, B.J. 2007. « Lean information management: Understanding and eliminating waste ». *International Journal of Information Management*, vol. 27, n° 4, p. 233-249.
- Hommes, Bart-Jan, et Victor van Reijswoud. 2000. « Assessing the quality of business process modelling techniques ». In *The 33rd Annual Hawaii International Conference on System Sciences (HICSS-33), January 4, 2000 - January 7, 2000*. (Maui, USA), p. 5. Coll. « Proceedings of the Hawaii International Conference on System Sciences »: IEEE.
- Howells, Richard. 2000. « ERP Needs Shop-Floor Data ». *Manufacturing Engineering*, vol. 125, n° 4, p. 54-56.
- ISA-95. 2000. *Enterprise-Control System Integration Part 1: Models and Terminology*. ANSI/ISA-95.00.01-2000: International Society of Automation, 142 p.
- ISA-95. 2005. *Enterprise Control System Integration Part 3 : Activity Models of Manufacturing Operation Management*. ANSI/ISA-95.00.03-2005: International Society of Automation, 101 p.
- ISA-95. 2007. *Business to manufacturing transactions*. ANSI/ISA-95.00.05-2007: International Society of Automation, 124 p.

- Jammes, F., H. Smit, J. L. M. Lastra et I. M. Delamer. 2005. « Orchestration of service-oriented manufacturing processes ». In *Emerging Technologies and Factory Automation, 2005. ETFA 2005. 10th IEEE Conference on.* (19-22 Sept. 2005) Vol. 1, p. 8 pp.-624.
- Larman, Craig (60). 2001. *Applying UML and patterns : an introduction to object-oriented analysis and design and the Unified Process*, 2 edition. Prentice Hall PTR, 656 p.
- Li, Zhaojun, Yan Chen et Xiuquan Chen. 2009. « A Reconfigurable Manufacturing Execution System and its Component Reuse ». In *Computational Intelligence and Natural Computing, 2009. CINC '09. International Conference on.* (6-7 June 2009) Vol. 2, p. 190-193.
- Liang, Chao, et Qing Li. 2006. « Manufacturing Execution Systems (MES) assessment and investment decision study ». In *Systems, Man and Cybernetics, 2006. SMC '06. IEEE International Conference on.* (8-11 Oct. 2006) Vol. 6, p. 5285-5290.
- MESA. 1997. « White Paper #06: MES Explained: A High Level Vision for Executives ». MESA International, 25 p.
- MESA. 2008. « SOA in manufacturing guidebook ». *MESA International*.
- MESA. 2011. « White paper #39 : MESA Model Evolution ».
- MESA. 2012. « About MESA ». In *MESA International - Home*. < <http://www.mesa.org/en/index.asp> >. Consulté le 13 mars 2012.
- Moody, Daniel. 2009. « The physics of notations: Toward a scientific basis for constructing visual notations in software engineering ». *IEEE Transactions on Software Engineering*, vol. 35, n° 6, p. 756-779.
- OMG, Object Management Group. 2011. *Business Process Model and Notation (BPMN)*. 538 p.
- Recker, Jan C., Marta Indulska, Michael Rosemann et Peter Green. 2005. « Do Process Modelling Techniques Get Better? A Comparative Ontological Analysis of BPMN ». In *16th Australasian Conference on Information Systems*. (Sydney, Australia, November 30 - December 2), sous la dir. de Campbell, Bruce, Jim Underwood et Deborah Bunker. < <http://eprints.qut.edu.au/2879/> >.
- Ricken, M, et B. Vogel-Heuser. 2010. « Modeling of Manufacturing Execution Systems: An interdisciplinary challenge ». *Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA), 2010 IEEE Conference on*, p. 1-8.

- Rosemann, Michael, Peter Green et Marta Indulska. 2004. « A Reference Methodology for Conducting Ontological Analyses ». In, sous la dir. de Atzeni, Paolo, Wesley Chu, Hongjun Lu, Shuigeng Zhou et Tok-Wang Ling. Vol. 3288, p. 110-121. Coll. « Lecture Notes in Computer Science »: Springer Berlin / Heidelberg. < http://dx.doi.org/10.1007/978-3-540-30464-7_10 >.
- Scholten, Bianca. 2007. *The road to integration : A guide to applying the ISA-95 standard in manufacturing*. Livre. État-Unis, 235 pages p.
- Shen, Weiming, Qi Hao, Hyun Joong Yoon et Douglas H. Norrie. 2006. « Applications of agent-based systems in intelligent manufacturing: An updated review ». *Advanced Engineering Informatics*, vol. 20, n° 4, p. 415-431.
- Witsch, Maria, et Birgit Vogel-Heuser. 2011. « Formal MES Modeling Framework - Integration of Different Views ». *Preprints of the 18th IFAC World Congress*.
- Witsch, Maria, et Birgit Vogel-Heuser. 2012. « Towards a formal specification framework for manufacturing execution systems ». *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, vol. 8, n° 2, p. 311-320.
- Zor, S., K. Görlach et F. Leymann. 2010. « Using BPMN for Modeling Manufacturing Processes ». In *Sustainable Production and Logistics in Global Networks - Proceedings of 43rd CIRP International Conference on Manufacturing Systems*. (Wien, Graz, May 2010), p. 515-522. Wilfried Sihn and Peter Kuhlang.