



HAL
open science

**Capitalisation et réutilisation de savoir-faire dans une
approche d'ingénierie système basée sur les modèles :
Application au système de distribution électrique
d'aéronefs**

Quentin Wu

► **To cite this version:**

Quentin Wu. Capitalisation et réutilisation de savoir-faire dans une approche d'ingénierie système basée sur les modèles : Application au système de distribution électrique d'aéronefs. Sciences de l'ingénieur [physics]. Université de Lorraine, 2020. Français. NNT : 2020LORR0112 . tel-02987886

HAL Id: tel-02987886

<https://theses.hal.science/tel-02987886>

Submitted on 4 Nov 2020

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Capitalisation et réutilisation de savoir-faire dans une approche d'ingénierie système basée sur les modèles : Application au système de distribution électrique d'aéronefs

THÈSE

présentée et soutenue publiquement le 1^{er} octobre 2020

pour l'obtention du

Doctorat de l'Université de Lorraine

(mention génie informatique, automatique et traitement du signal)

par

Quentin WU

Composition du jury

Éric BONJOUR	Professeur, Université de Lorraine	<i>Président</i>
Jean-Yves CHOLEY	Professeur, Supméca groupe ISAE	<i>Rapporteur</i>
Frédéric KRATZ	Professeur, INSA Centre Val de Loire	<i>Rapporteur</i>
Vincent CHAPURLAT	Professeur, École des Mines d'Alès	<i>Examineur</i>
Éric LEVRAT	Professeur, Université de Lorraine	<i>Directeur de thèse</i>
David GOUYON	Maître de conférences, Université de Lorraine	<i>Co-directeur de thèse</i>
Sophie BOUDAU	Cheffe de pôle, Safran Electrical & Power	<i>Encadrante</i>
Pascal HUBERT	Chef de pôle, Safran Electronics & Defense	<i>Invité</i>
Hubert SAMUT	Chef de pôle, Safran Electrical & Power	<i>Invité</i>

Remerciements

Alors que j'écris ces dernières lignes, je ne peux m'empêcher de me retourner pour contempler le chemin parcouru. Ce chemin, je n'aurai pas pu le faire seul, car de nombreuses personnes m'ont permis de le tracer. C'est eux, que je souhaite mettre en avant dans ces remerciements.

Je tiens à remercier Monsieur Éric BONJOUR, Professeur à l'Université de Lorraine, de m'avoir fait l'honneur de présider mon jury de soutenance.

Je suis très reconnaissant envers Monsieur Jean-Yves CHOLEY, Professeur à l'Institut Supérieur de Mécanique de Paris du groupe ISAE, et Monsieur Frédéric KRATZ, Professeur à l'Institut National des Sciences Appliquées Centre Val de Loire, d'avoir accepté d'étudier mon travail et d'en être les rapporteurs ainsi que pour l'intérêt et l'attention qu'ils ont accordé à cette étude.

Je tiens également à remercier Monsieur Vincent CHAPURLAT, Professeur à l'Institut Mines-Télécom d'Alès, d'avoir accepté d'examiner ces travaux.

Je tenais ensuite à remercier chaleureusement toutes les personnes ayant participé à l'encadrement de cette thèse. Je tiens à les remercier de m'avoir accordé leur confiance afin de mener à bien ces travaux. Du côté académique tout d'abord :

Éric Levrat, professeur à l'Université de Lorraine. Merci Éric d'avoir toujours trouvé du temps en dépit de tes nombreuses responsabilités. Tes remarques honnêtes et constructives m'ont permis de grandir et de nourrir ces travaux.

David Gouyon, maître de conférences à l'Université de Lorraine. Merci David pour ton implication totale et le suivi régulier que tu as assuré qui a grandement contribué à l'aboutissement de cette thèse. Tu m'as apporté une aide scientifique majeure pour structurer ma pensée et pour améliorer la qualité de ces travaux.

Je vous remercie pour ces années enrichissantes et conviviales.

Du côté industriel, mes remerciements vont à :

Pascal Hubert, à l'origine de la thèse pour Zodiac Aerospace avant le rachat par Safran. Je suis très heureux que tu aies pu assister à la soutenance afin de boucler la boucle !

Sophie Boudau, qui a accepté de reprendre l'encadrement de la thèse à la suite de Pascal et de poursuivre la direction envisagée par ces travaux. Tu m'as permis de créer un environnement serein pour réaliser mes travaux.

Je vous remercie de m'avoir accueilli chez Zodiac puis Safran pendant ces années de travail.

Lors de mes déplacements au laboratoire, j'ai toujours été accueilli de manière très amicale. En premier lieu, merci à Benoît Iung, qui a fait partie du comité de suivi de ma thèse, et de l'intérêt porté à mes travaux. Je tiens également à remercier : Sarah, Concetta, Alexis, Pascal, Alexandre, Florence pour leur accueil et les bons moments passés.

Je remercie également mes collègues de Safran que j'ai côtoyé quotidiennement avec plaisir : Raphaël, Thibaut, Seddiq, Fabrice, Mélanie, Marie, Guillaume, Sébastien, Rym, Olivier, Hubert, Emmanuel, Frédéric, Bruno. Mention spéciale aux membres de la Team Gros Lardons : Bruno, Thomas, Kevin, Ludo, Maxence et Philippe pour les sorties courses à pied au Bois de Vincennes et dans notre recherche d'un subtil équilibre entre sport et fromage fondue.

Un grand merci aux copains partout en France et dans le monde pour les bons moments passés ensemble. Une grande partie du travail d'explication de mes travaux est passée par vos questions et interrogations, alors merci !

Merci également à mes parents pour leur soutien indéfectible.

Enfin, mes derniers mots vont à celle qui partage ma vie depuis tant d'années. Cette thèse tu en as aussi vécu une partie, merci pour tout ce que tu apportes dans ma vie... À notre avenir !

Table des matières

Liste des tableaux.....	9
INTRODUCTION GENERALE	11
CHAPITRE 1.	15
CONTEXTE ET PROBLEMATIQUE INDUSTRIELS	15
1.1. Contexte des travaux : Ingénierie des systèmes de distribution d'énergie électrique d'aéronefs.....	17
1.1.1. Système de distribution d'énergie électrique d'aéronefs	17
1.1.2. Évolution vers un avion « tout électrique »	19
1.1.3. Systèmes complexes et systèmes critiques : définitions préliminaires	22
1.2. Transition vers de nouvelles pratiques d'ingénierie.....	23
1.2.1. Documents vs modèles.....	23
1.2.2. Transition vers l'ISBM.....	29
1.2.3. Facilitateurs d'adoption de nouvelles pratiques d'ingénierie.....	31
1.2.4. Définition des artefacts de modélisation	33
1.3. Formalisation du problème industriel	34
1.3.1. Environnement industriel.....	34
1.3.2. Enjeux du changement de pratiques d'ingénierie.....	37
CHAPITRE 2.....	41
ÉTAT DE L'ART ET POSITIONNEMENT SCIENTIFIQUE	41
2.1. L'évolution des pratiques de valorisation d'actifs d'ingénierie.....	43
2.1.1. Capitalisation et réutilisation d'actifs d'ingénierie	43
2.1.2. Diversité des activités de réutilisation en Ingénierie Système	47
2.1.3. Vers la réutilisation de modèles pour le transfert de connaissances et de savoir-faire	53
2.2. L'utilisation de patrons pour la valorisation des actifs d'ingénierie.....	54
2.2.1. Historique sur l'utilisation des patrons	54
2.2.2. Utilisation de patrons en Ingénierie Système.....	56
2.3. Utilisation de patrons dans le cadre de la transition vers l'Ingénierie Système Basée sur les Modèles.....	63
2.3.1. Réutilisation de modèles dans le cadre de l'adoption de méthodologies d'Ingénierie Système Basée sur les Modèles	63
2.3.2. Utilisation de patrons en Ingénierie Système Basée sur les modèles.....	65
2.3.3. Limites de patrons en Ingénierie Système Basée sur les Modèles.....	67

CHAPITRE 3.....	71
VALORISATION DES ACTIFS D'INGENIERIE POUR FACILITER LA TRANSITION VERS L'INGENIERIE SYSTEME BASEE SUR LES MODELES	71
1.1. Évaluation de la maturité du processus de réutilisation	73
1.1.1. Intérêts de l'évaluation de la maturité.....	73
1.1.2. Échelles de maturité.....	73
1.1.3. Proposition d'une évaluation de la maturité de la valorisation des actifs d'ingénierie	75
1.1.4. Introduction du concept de patron	82
1.2. Formalisation de niveaux d'abstraction	82
1.2.1. Définitions des niveaux d'abstraction	82
1.2.2. Transitions entre niveaux d'abstraction	86
1.2.3. Maturité des « patrons »	89
1.3. Contribution méthodologique proposée	91
1.3.1. Vue de haut niveau de l'approche MMIP	92
1.3.2. Processus stratégique de l'approche MMI.....	94
1.3.3. Processus Opérationnel de l'approche MMI	97
1.4. Décision de capitaliser	102
1.4.1. Accompagner la transition vers l'ISBM	102
1.4.2. Un potentiel de réutilisation... ..	103
1.4.3. ... assez peu exploité.....	104
CHAPITRE 4.....	107
MISE EN ŒUVRE DE L'APPROCHE METHODOLOGIQUE ET ANALYSE	107
4.1. Particularités SAFRAN du contexte de l'étude	109
4.1.1. Cadre SAFRAN d'architecture et de modélisation	109
4.1.2. Système étudié (système à faire).....	114
4.2. Application de la méthodologie	116
4.2.1. Processus stratégique	116
4.2.2. Processus opérationnel	123
4.3. Synthèse et évaluation	144
4.3.1. Maturité du processus de réutilisation	144
4.3.2. Retour d'expérience sur l'adoption de l'IBSM	146
Conclusion	151

Table des figures

Figure 1. Cœur électrique d'un A380	17
Figure 2. Architecture type du réseau électrique d'un biréacteur. Circuits hydrauliques en tirets noirs (H1 à H3), extrait de (Barruel, 2005)	18
Figure 3. Répartition des charges sur A380 en fonction des configurations.....	20
Figure 4. Relations entre IS, système à faire et système pour faire, extrait de (Fiorèse & Meinadier, 2012)	23
Figure 5. Typologie des modèles IS (adapté de l'AFIS)	26
Figure 6. Relations entre Processus, Méthodes, Outils et Environnement (extrait de (Estefan, 2008))	27
Figure 7. Ingénierie centrée : sur les documents (a), versus, sur les modèles (b)	28
Figure 8. Exemple de modèle système dans SysML, extrait d'un tutoriel de l'INCOSE sur le SysML.....	29
Figure 9. Tendances générales d'adoption des méthodologies ISBM (avec capitalisation)	36
Figure 10. Patron de séquence au sens de (Vogel, 1988)	36
Figure 11. Approche défendue dans cette thèse pour l'adoption des méthodologies ISBM ...	36
Figure 12. Création et transfert d'actifs d'ingénierie à différents niveaux de complexité	44
Figure 13. Les différents niveaux de connaissances sur un artefact d'ingénierie, extrait de (Ye & Fischer, 2002).....	48
Figure 14. (a) Point-Based Design, (b) Set-Based Design extrait de (Kennedy et al., 2014) ...	50
Figure 15. Triangle minimal d'un patron, extrait de (Gaffar & Moha, 2005a)	58
Figure 16. Liste recommandée de caractéristiques pour décrire un patron système, extrait de (Cloutier & Verma, 2007).....	59
Figure 17. Exemple de patron d'Ingénierie Système de la boucle de contrôle-commande en langage eFFBD, extrait de (F Pfister et al., 2012)	59
Figure 18. Utilisation des patrons en fonction de la taille de l'équipe de développement, extrait de (Hahsler, 2005).....	60
Figure 19. Patron de processus de réutilisation de connaissance pour l'innovation, extrait de (Majchrzak et al., 2004)	62
Figure 20. Diagramme de Venn décrivant les relations entre UML et SysML, extrait de (OMG 2017a, p. 9)	64
Figure 21. Patron « Loop Exit Construct », extrait de (Gasser, 2012)	66
Figure 22. Échelle de maturité pour la valorisation des actifs d'IS	75
Figure 23. Niveaux d'abstractions pour les modèles dans un contexte d'ISBM	83
Figure 24. Exemples de modèles.....	83
Figure 25. Exemples de modèles génériques	84
Figure 26. Exemples de patrons de conception	85
Figure 27. Exemples de patrons abstraits	85
Figure 28. Processus de capitalisation et de réutilisation.....	86
Figure 29. Sous-processus de capitalisation et de réutilisation.....	87
Figure 30. Vue globale de l'approche MMIP.....	93
Figure 31. Vue du processus « MMIP_STRAT »	95
Figure 32. Description du processus stratégique	96
Figure 33. Vue du processus « MMIP_OP »	98
Figure 34. Description du processus opérationnel	99
Figure 35. Description du processus opérationnel « minage »	100
Figure 36. Description du processus opérationnel « maturation »	101
Figure 37. Description du processus opérationnel « implémentation ».....	102
Figure 38. Exemple d'une fonction répétée (à gauche) et de sa factorisation (à droite)	103
Figure 39. Matrice structurant le cadre d'architecture CESAM (Krob, 2017)	110

Figure 40. Cube d'analyse système, adapté de CESAM (Krob, 2017).....	111
Figure 41. Artefacts capitalisés (en bleu), hors périmètre de réutilisation (en orange)	113
Figure 42. Métamodèle des concepts en librairie	114
Figure 43. Exemple de deux fonctions similaires	118
Figure 44. Fonction générique issue de deux fonctions similaires	118
Figure 45. Décomposition fonctionnelle d'un système de distribution électrique présentant des similarités qu'il est possible de généraliser	124
Figure 46. Décomposition fonctionnelle générique.....	125
Figure 47. Environnement de la fonction « Distribute Normal 230 Vac ».....	126
Figure 48. Environnement de la fonction « Distribute Normal 115 Vac ».....	127
Figure 49. Environnement de la fonction « Distribute Normal 28 Vdc »	127
Figure 50. Environnement fonctionnel générique d'une fonction « Distribute normal »	127
Figure 51. Flux fonctionnels entre les fonctions de distribution et de conversion	128
Figure 52. Environnement générique préliminaire pour la distribution normale (a).....	128
Figure 53. Environnement générique pour la distribution normale (b).....	129
Figure 54. Extrait d'une chaîne fonctionnelle de la distribution normale en 230Vac (à gauche), de la distribution normale en 115Vac (à droite)	130
Figure 55. Chaîne fonctionnelle générique du transport à la conversion d'une distribution normale	132
Figure 56. Extrait de la décomposition fonctionnelle de la fonction distribution normale générique.....	132
Figure 57. Patron de conception concernant les fonctions génériques :	133
Figure 58. Patron de conception de la décomposition fonctionnelle d'une fonction de distribution.....	133
Figure 59. Principe essentiel de combinaison du jeu de domino.....	134
Figure 60. Fonctions élémentaires (à gauche), pièces de dominos (à droite)	135
Figure 61. Exemple d'utilisation des dominos	136
Figure 62. Initialisation des pièces de dominos.....	136
Figure 63. Exemple pour un système de distribution de 3 génératrices et 2 charges	137
Figure 64. Extrait d'un SLD utilisé pour un projet avec Boeing	140
Figure 65. Zoom sur une partie du SLD.....	141
Figure 66. Fonction « Distribute normal [value][type] »	142
Figure 67. Fonction « Convert [value1][type1] to [value2][type2] »	143
Figure 68. Association des fonctions « Distribute normal... » et « Convert... »	143
Figure 69. Modèle spécifique instancié (niveau N).....	143
Figure 70. Modèle spécifique instancié (niveau N-1).....	144
Figure 71. Deux manières de réaliser la même activité d'IS	147

Liste des tableaux

Tableau 1. Niveaux de complexité système et moyens de transfert	46
Tableau 2. Caractéristiques récurrentes (CR) des patrons dans la littérature	56
Tableau 3. Niveaux de maturité de l'échelle RCM, adapté de l'anglais depuis (Rine & Sonnemann, 1998)	74
Tableau 4. Indicateurs de maturité pour le niveau 1	76
Tableau 5. Description de chaque niveau de maturité.....	77
Tableau 6. Indicateurs de maturité pour le niveau 2	78
Tableau 7. Indicateurs de maturité pour le niveau 3	78
Tableau 8. Indicateurs de maturité pour le niveau 4	79
Tableau 9. Indicateurs de maturité pour le niveau 5	79
Tableau 10. Combinaison possible des niveaux de maturité	80
Tableau 11. Exemple du calcul de niveau de maturité global avec la formule (3)	81
Tableau 12. Exemple du calcul de niveau de maturité global avec la formule (3)	81
Tableau 13. Répartitions des rôles selon les transitions et les niveaux d'abstraction	89
Tableau 14. Expression de besoins pour les librairies	121
Tableau 15. Exemple d'une fiche d'accompagnement pour le patron de niveau modèle générique « Distribute normal [value][type] »	139
Tableau 16. Transcription des concepts à utiliser entre les langages de modélisations pour X-ATIS et IBM Rhapsody (SysML)	142
Tableau 17. Indicateurs de maturité pour le niveau 3.....	145
Tableau 18. Résultat du calcul de maturité global en fonction des combinaisons de maturité atteignables	165

Introduction générale

Ce manuscrit s'inscrit dans la continuité de travaux sur la relation entre l'être humain et la complexité du monde qui l'entoure. Certains l'écrivent dans des romans, d'autres l'analysent par des équations. Les travaux présentés dans ce manuscrit souhaitent appréhender cette relation par l'étude de processus consistant à déconstruire la complexité, pour en saisir simplement les phénomènes, interactions et fonctionnalités qui y prennent place. Le but de cette étude est ensuite d'aider à traiter de nouvelles situations en « tenant compte de l'expérience passée » (Berthoz, 2009).

Dans le contexte de nos travaux, nous nous intéressons à l'apprentissage et l'application d'une nouvelle pratique d'ingénierie pour la conception de systèmes complexes critiques à partir de l'expertise disponible dans le domaine des systèmes de distribution électrique d'aéronefs. Si l'Ingénierie Système (IS) a permis d'améliorer la conception, et le développement de ces systèmes, les pratiques actuelles ne permettent plus de gérer correctement la complexité croissante de ces systèmes. En effet, les grandes quantités de données produites lors des différentes phases du cycle d'ingénierie sont actuellement gérées à l'aide de documents textuels, et demandent beaucoup d'efforts et de temps pour les maintenir et les faire évoluer au fur et à mesure de l'avancement d'un projet. Afin de relever ces défis, la communauté d'Ingénierie Système a mis en avant une approche dite d'« Ingénierie Système Basée sur les Modèles » (ISBM), où la modélisation est le support de toutes les activités d'ingénierie. Cette approche permet de grandes améliorations par rapport aux pratiques actuelles, notamment dans l'accélération des cycles d'ingénierie, l'amélioration de la communication entre équipes d'ingénierie et la mise en cohérence des données d'ingénieries (Estefan, 2008). Cependant, de nombreux retours d'expériences en ISBM (Bone & Cloutier, 2010; Chami et al., 2018; Gregory et al., 2020; Holt et al., 2015; Huldt & Stenius, 2018; Vogelsang et al., 2017) soulignent le besoin important en temps et ressources et notamment la nécessité d'un changement culturel fort et transverse à l'entreprise afin de réussir l'implémentation d'une ISBM. Le passage d'une ingénierie basée sur les documents (exigences) vers une ingénierie basée sur les modèles fait évoluer le travail de spécification, de revue de pair, et d'échanges d'informations et de données lors du développement d'un système. C'est pourquoi les nombreux retours d'expériences cités précédemment soulignent également la difficulté pour les ingénieurs de s'approprier cette nouvelle approche, qui bouleverse le quotidien auquel ils étaient habitués.

Or, dans un contexte de transition, il est nécessaire de trouver et de s'appuyer sur des atouts en faveur du changement culturel, qui ne remettront pas en question les savoir-faire des ingénieurs sur le système à développer. En effet, il est nécessaire de démontrer aux ingénieurs système que cette nouvelle pratique d'ingénierie a toujours pour finalité de les aider à concevoir leur système, même si leurs pratiques quotidiennes d'ingénierie évoluent. En effet, contrairement aux pratiques d'ingénierie qui peuvent changer, le savoir-faire de l'ingénieur est pérenne et reste la clé pour le développement de « bons » systèmes (respect des exigences des parties prenantes, des exigences induites,...). D'autant plus que, l'expérience acquise par des années de pratique fournit un avantage pour la spécification et l'anticipation d'éventuels points durs. Le savoir-faire d'ingénierie est donc le pivot sur lequel la transition vers l'ISBM

peut s'appuyer. Cette expérience s'acquiert et évolue tout au long de la carrière d'un ingénieur, demandant l'accumulation d'un grand nombre de connaissances. La capacité d'accélérer la phase « d'éducation » ou du moins mettre à disposition l'expertise d'un domaine pour l'ensemble des ingénieurs est l'un des axes d'amélioration actuellement poursuivi dans des industries aussi diverses que l'aéronautique, l'énergie, le transport terrestre...

Cette thèse défend l'idée que pour faciliter la transition vers une approche ISBM, il faut capitaliser des actifs d'ingénierie à forte valeur ajoutée et les valoriser en les intégrant dans de nouvelles pratiques plus adaptées à la complexité des futurs systèmes. Autrement dit, la contribution présentée dans ce mémoire porte sur la facilitation de la transition vers une démarche d'ISBM via la capitalisation et la réutilisation de savoir-faire. L'une des thématiques de ces travaux de thèse s'intéresse donc à la définition d'une approche pour la capture et la réutilisation de savoir-faire. En ce sens, nos travaux poursuivent donc les réflexions déjà amorcées sur l'utilisation du concept de « patron » pour l'IS (Cloutier & Verma, 2007; Haskins, 2005; François Pfister et al., 2011), en précisant son rôle et son périmètre dans le paradigme de l'ISBM.

Le premier chapitre de ce manuscrit a pour objectif de présenter le contexte industriel lié à l'électrification grandissante des systèmes aéronautiques, ainsi que de la problématique à l'origine de ces travaux. Dans un premier temps, l'influence du contexte aéronautique (global) sur l'évolution de la complexité des systèmes y est décrit. Le chapitre développe ensuite les problématiques liées à la transition de l'IS à l'ISBM et fournit une première piste de réflexion pour faciliter l'adoption de nouvelles pratiques d'ingénierie. La problématique industrielle des travaux conclut ce chapitre en explicitant, le contexte industriel (local à l'entreprise d'accueil de ces travaux de thèse), les premiers retours d'expériences industriels d'adoption de l'ISBM et les verrous à lever.

Le second chapitre présente l'intérêt de valoriser le savoir-faire d'ingénierie face au défi de l'augmentation de la complexité des systèmes tout en soulignant que les moyens actuels de valorisation ne sont pas suffisants et doivent évoluer. Cela nécessite que l'approche choisie pour capturer le savoir-faire soit capable de supporter les processus de capitalisation et de réutilisation. La suite du chapitre consiste en l'étude de la pertinence de l'utilisation du concept de « patron » que nos travaux proposent d'utiliser pour capitaliser et réutiliser du savoir-faire. Un état de l'art concernant le concept de « patron » en IS est réalisé et mis en regard avec les travaux sur la réutilisation de modèles proposés en ISBM. Le positionnement scientifique de nos travaux est introduit à l'issue de ce chapitre, après avoir présenté les avantages et limites actuelles du concept de « patron ».

Le troisième chapitre est consacré à la définition d'un processus pour la valorisation d'actifs d'ingénierie. Une échelle de maturité est d'abord définie pour évaluer la maturité du processus de valorisation et cibler les efforts à réaliser. Ensuite, pour augmenter le niveau de maturité du processus, le patron méthodologique MMIP est proposé. Ce dernier s'appuie sur la proposition d'une classification de différents niveaux d'abstraction du concept de « patron ». Une fois ces niveaux définis, les processus de la méthodologie sont décrits. À la fin du chapitre, l'application de cette méthodologie dans le cadre industriel de la thèse est justifiée.

Le quatrième chapitre présente la mise en œuvre du patron méthodologique MMIP sur un cas d'étude industriel. Les particularités du contexte d'ingénierie chez Safran Electrical & Power (SEP) sont présentées afin de montrer la flexibilité du patron méthodologique et la manière dont il peut servir de guide lors de son application. Le cas d'étude est ensuite basé sur la mise en œuvre d'une démarche de capitalisation puis de réutilisation du savoir-faire ainsi capturé dans un nouveau projet. En fin de chapitre, une analyse sur l'évolution du niveau de maturité du processus de valorisation est réalisée, ainsi qu'une analyse sur la capacité des patrons à faciliter l'adoption de l'ISBM.

Le mémoire se conclut en rappelant les principales contributions de ce travail et leur apport dans le cadre de l'adoption de l'ISBM. Enfin, des perspectives de recherche sont proposées pour enrichir l'approche présentée dans ce mémoire par la montée en maturité des outils supports de l'ISBM, ainsi que l'automatisation de certains processus, et la création de degrés de liberté supplémentaire dans l'utilisation des « patrons ».

Chapitre 1.

Contexte et problématique industriels

Sommaire du chapitre

1.1. Contexte des travaux : Ingénierie des systèmes de distribution d'énergie électrique d'aéronefs	17
1.1.1. Système de distribution d'énergie électrique d'aéronefs	17
1.1.2. Évolution vers un avion « tout électrique »	19
1.1.3. Systèmes complexes et systèmes critiques : définitions préliminaires	22
1.2. Transition vers de nouvelles pratiques d'ingénierie	23
1.2.1. Documents vs modèles	23
1.2.2. Transition vers l'ISBM	29
1.2.3. Facilitateurs d'adoption de nouvelles pratiques d'ingénierie	31
1.2.4. Définition des artefacts de modélisation	33
1.3. Formalisation du problème industriel.....	34
1.3.1. Environnement industriel	34
1.3.2. Enjeux du changement de pratiques d'ingénierie	37

Introduction

Ce chapitre débute par une présentation des objectifs et des contraintes dans la conception et le développement de systèmes de distribution électrique d'aéronefs. Il présente ensuite une formalisation du problème de transition de méthodes d'ingénierie dites « centrées sur les documents » vers des méthodes « basées sur les modèles ». Enfin, le chapitre se conclut par une synthèse argumentée qui justifie l'intérêt de capitaliser et réutiliser du savoir-faire dans le cadre d'une démarche de transition vers une approche ISBM et présente les principaux enjeux industriels qui feront l'objet des contributions proposées dans ce mémoire.

1.1. Contexte des travaux : Ingénierie des systèmes de distribution d'énergie électrique d'aéronefs

1.1.1. Système de distribution d'énergie électrique d'aéronefs

Les systèmes de distribution d'énergie électrique, également nommés « cœurs électriques » (Figure 1) sont au centre du réseau électrique d'un avion.

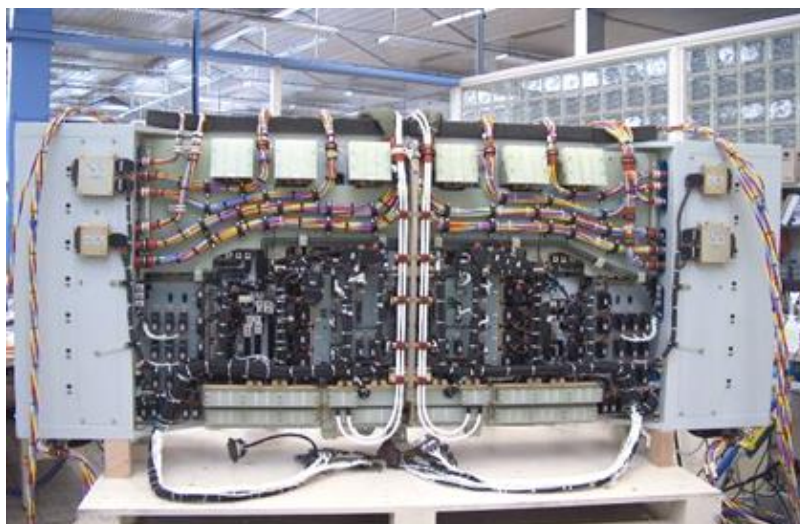


Figure 1. Cœur électrique d'un A380

Il s'agit de systèmes destinés, notamment :

- à la conversion d'énergie, à la gestion et à la distribution de l'énergie électrique,
- à la détection, surveillance, protection, transmission et traitement d'informations,
- à la protection des circuits électriques.

Ces systèmes sont destinés à des applications militaires ou civiles. Ils mettent en oeuvre les compétences de l'électromécanique, de l'électronique, du logiciel, ... En fonction des besoins exprimés par les clients, les nouveaux projets sont de nature plus ou moins complexe suivant qu'il s'agisse :

- de systèmes dérivés de produits déjà existants, ou à concevoir dans leur intégralité,

- de systèmes « simples » correspondant à un domaine unique de compétence ou de matériels,
- de systèmes « complexes » devant faire appel à plusieurs domaines et/ou avec une dimension système.

Ces systèmes sont essentiels dans un aéronef. En effet, toute l'énergie fournie par les génératrices situées sur les moteurs, par le groupe auxiliaire de puissance (*Auxiliary Power Unit – APU*), par les batteries, et/ou par la prise de parc¹ est amenée vers les cœurs et alimentent des busbars. Dans l'architecture proposée en Figure 2, deux alternateurs sont connectés aux turbines (*Engine+Gen*) et alimentent chacun un busbar de 115V-400Hz. Le cœur va ensuite acheminer cette puissance électrique vers différentes charges techniques (cockpit, systèmes de freinage, dégivrage, pressurisation...) ou commerciales (cabine passager...). Ces charges ont différents degrés d'importance et de priorité (cf section 1.1.2.1, Figure 3). Les systèmes de distributions électriques ont aussi un rôle de protection, car ils doivent permettre aux parties vitales de l'avion de fonctionner en cas de panne. Ainsi, toutes les charges alimentées par le cœur sont protégés (Figure 2). Cette protection passe par la redondance d'éléments clés ainsi que par l'utilisation de nombreux organes de coupures (pilotés ou non) afin d'isoler les parties du circuit en défaut et afin de reconfigurer le cœur pour continuer à assurer l'alimentation électrique des charges.

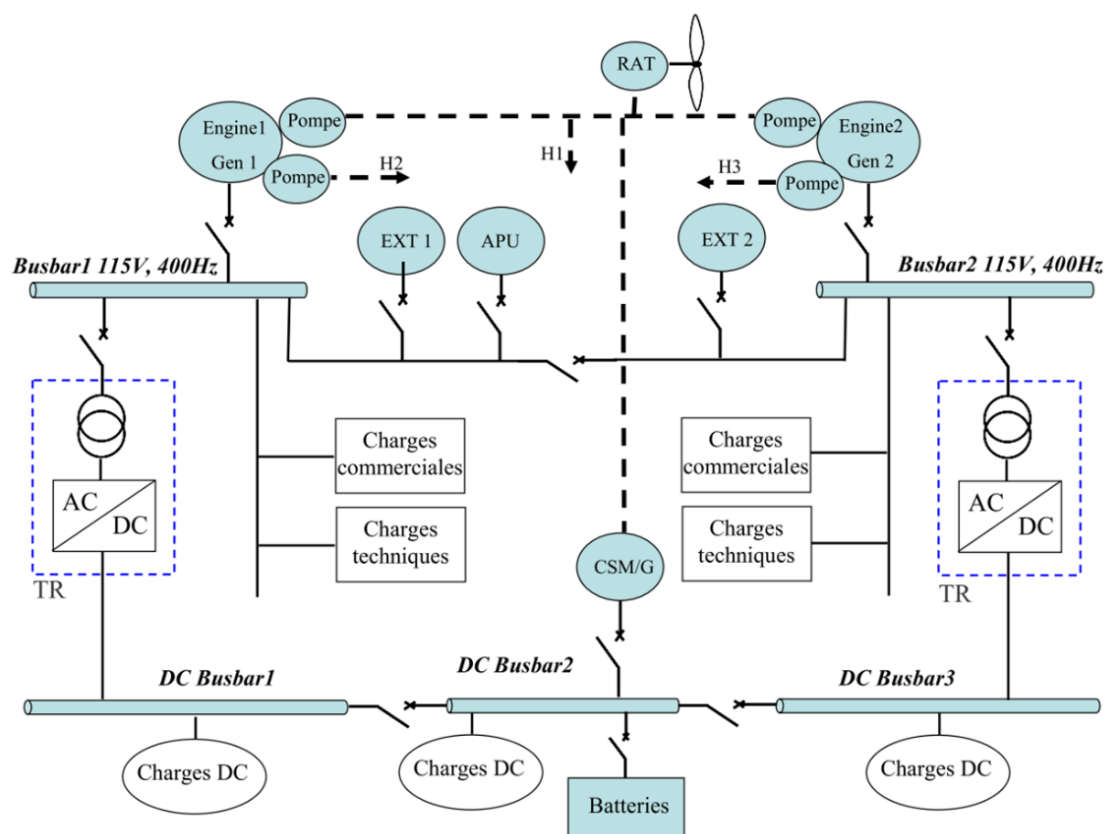


Figure 2. Architecture type du réseau électrique d'un biréacteur. Circuits hydrauliques en tirets noirs (H1 à H3), extrait de (Barruel, 2005)

¹ Il s'agit d'une prise électrique à l'extérieur de l'avion qui permet d'assurer l'alimentation électrique des aéronefs au sol.

1.1.2. Évolution vers un avion « tout électrique »

Au début de l'aviation, l'énergie électrique n'était utilisée que pour les fonctions auxiliaires (démarrage moteur, éclairage...), tandis que les fonctions primaires étaient réalisées grâce à de l'énergie mécanique, hydraulique et/ou pneumatique. Les évolutions de l'aéronautique moderne ont conduit à l'augmentation de l'utilisation de l'énergie électrique afin de répondre à des objectifs de diminution de masse mais également de performances et de sécurité.

1.1.2.1. Gains attendus

La masse est un critère déterminant dans le choix des technologies avionnables² (Langlois et al., 2005), puisqu'à distance égale, un avion moins lourd va utiliser moins de carburant. Ainsi, dans un A380, le remplacement de système électro-hydraulique par des systèmes purement électriques a permis des gains de masse estimés à 1.2 tonnes sur l'ensemble de l'avion (Barruel, 2005). Or, d'après Air France Industries, un allègement de la structure d'une tonne représente, une réduction de consommation de 1.000 tonnes de kérosène ou une réduction de plus de 3.000 tonnes de gaz à effet de serre par an et par avion³. De ce fait, l'enjeu autour de la consommation de carburant n'est plus seulement économique. En effet, il s'accompagne depuis quelques années d'une transition vers des enjeux environnementaux tels que la dépendance aux énergies fossiles et la réduction des émissions de gaz à effet de serre. Ces nouveaux enjeux sont autant de défis à résoudre pour l'industrie aéronautique pour les prochaines années, d'autant plus que, ces problématiques se déplacent également de la sphère industrielle vers la sphère publique, par la prise de conscience collective autour des enjeux écologiques liés aux dérèglements climatiques.

L'augmentation de la part des équipements électriques vise également à travailler sur des solutions innovantes qui ne seraient pas réalisables par des dispositifs pneumatiques ou hydrauliques. C'est par exemple le cas du projet conjoint « *Electric Taxiing* »⁴ entre Safran et Airbus, qui développe un programme de roulage électrique pour la famille des A320. Au lieu d'utiliser les moteurs principaux pour les opérations de roulage sur le tarmac des aéroports (consommation de carburant, usure des moteurs), l'avion utilisera de petits moteurs électriques installés dans les roues des trains d'atterrissages. Le système permet de reculer et de se déplacer au sol de façon entièrement autonome, sans avoir recours aux moteurs principaux.

Le besoin de sécurité ainsi que le confort passager sont autant d'arguments qui expliquent l'augmentation de l'utilisation de l'énergie électrique. C'est le cas notamment avec l'introduction des commandes de vol numériques « *Fly by Wire* »⁵, à la place du traditionnel « manche à balai » où le pilote agissait directement sur les gouvernes de l'avion par une liaison mécanique. Dans un premier temps, l'introduction de commandes de vol électriques permet de faciliter le pilotage de l'avion en masquant et en automatisant toutes une série d'actions pour le pilote. Dans un deuxième temps,

² Néologisme fortement utilisé dans l'industrie aéronautique : « prêt à être utilisé/qui peut être utilisé dans un avion »

³ Rapport du Ministère de l'Équipement, des Transports, de l'Aménagement du Territoire, du Tourisme et de la mer : <https://www.vie-publique.fr/sites/default/files/rapport/pdf/054000324.pdf> (p. 34)

⁴ www.safran-landing-systems.com/fr/systemes/roulage-electrique

⁵ L'A320 d'Airbus est le premier à sauter le pas à la fin des années 80, en remplacement des systèmes mécaniques.

un ordinateur vient désormais compléter l'ensemble du système afin de conserver l'avion dans son domaine de vol (régimes et altitudes sûrs).

Les besoins en énergie évoluent donc dans le cockpit, mais également dans la cabine où l'amélioration du confort passager demande une utilisation en forte augmentation de l'énergie électrique : sièges électriques, lecteur vidéo, prises de courant... Cette nouvelle demande en énergie électrique implique une augmentation du nombre de charges électriques à pourvoir et nécessite une répartition toujours plus fine et maîtrisée de l'énergie électrique afin de gérer les différentes configurations d'un système de distribution électrique d'aéronefs. Une configuration correspond à un état du réseau électrique dans lequel il faut alimenter un ensemble de charges en fonction du nombre de sources d'énergies disponibles. L'objectif dans chaque configuration est d'optimiser la consommation par rapport à la génération de puissance. L'électrification de l'aéronef fournit donc des avantages certains sur la disponibilité avion grâce à la capacité de reconfiguration d'un réseau électrique en comparaison de réseaux hydrauliques ou pneumatiques. Il devient en effet plus facile de détecter et d'isoler des pannes, et d'y faire face en reconfigurant le réseau.

Ainsi, pour l'A380, la consommation en configuration « normale » (croisière) est au maximum de 425 kVA, et alimentée à hauteur de 600 kVA par 4 générateurs de 150 kVA. En cas de configuration « secours » (perte totale des moteurs) la consommation est alors au maximum de 53 kVA et l'alimentation se fait par un système de génération de secours (*Ram Air Turbine – RAT⁶*) à hauteur de 70 kVA. La répartition entre les différentes charges pour chaque configuration d'un A380 est représentée sur la Figure 3.

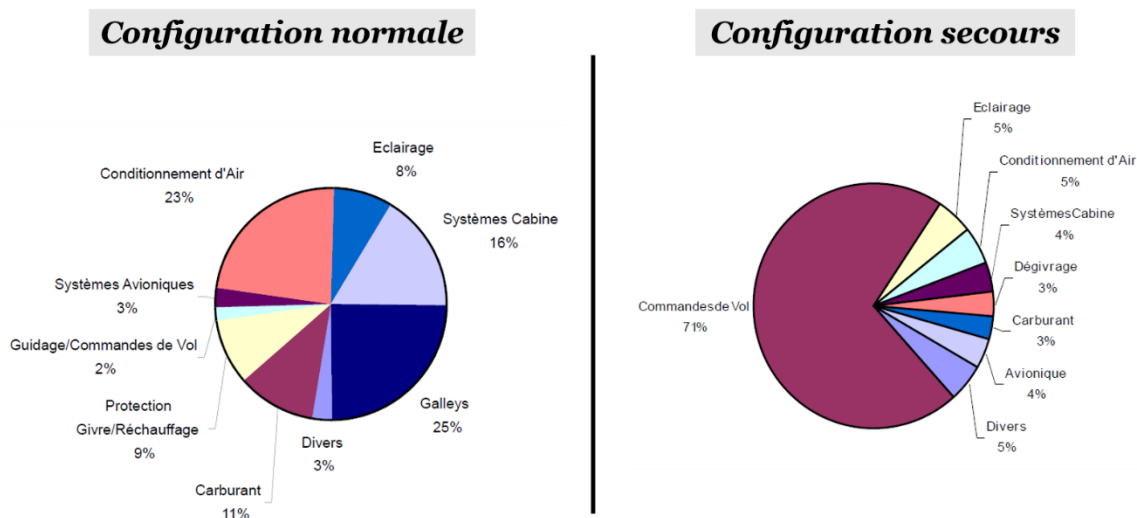


Figure 3. Répartition des charges sur A380 en fonction des configurations

Il apparaît qu'en configuration « normale » les trois quarts de l'énergie électrique produite sont dédiées au confort passager (galleys⁷, conditionnement d'air, systèmes cabine, éclairage...), par rapport au contrôle et à la sécurité de l'avion, tandis

⁶ La RAT est une éolienne qui est déployée sous l'aile ou le fuselage de l'avion. Elle permet de fournir le minimum vital d'énergie afin de permettre au pilote de poser l'avion.

⁷ Dans l'aviation, ce terme vient de l'anglais et signifie cuisine. C'est la partie de la cabine d'un avion où est situé l'essentiel de l'armement (matériels de bord), commissariat (éléments spécifiques au confort passager), les fours, les trolleys (chariots)...

qu'en configuration « secours » c'est l'inverse, puisqu'il va de soi que le confort en cabine est moins prioritaire que l'atterrissage de l'avion.

Depuis l'A380, des évolutions ont eu lieu dans l'industrie afin de poursuivre l'électrification des aéronefs. À long terme, l'objectif est d'orienter les avions vers du « tout électrique », et c'est ainsi que le terme « MEA » (« *More Electrical Aircraft* ») a commencé à émerger. Les projets sont nombreux, et le sujet en pleine expansion, comme l'a démontré le récent Salon International de l'Aéronautique et de l'Espace (SIAE) 2019, au cours duquel s'est déroulé la réunion annuelle du Conseil pour la recherche aéronautique civil (CORAC)⁸, où une nouvelle feuille de route a été adoptée pour l'horizon 2020 – 2025. L'un des axes majeurs concerne l'électrification des systèmes non propulsifs^{9,10}. L'importance du sujet « électrification » se voit également par l'émergence de conférences sur le sujet telle que l'*AIAA/IEEE Electrical Aircraft Technologies Symposium*¹¹ (2^{ème} édition en 2019) ou encore la conférence *More Electrical Aircraft*¹² (5^{ème} édition en 2019).

1.1.2.2. Impact sur la complexité en ingénierie

L'augmentation de l'électrification des aéronefs va conduire à une complexification des systèmes de distribution électrique. En effet, pour assurer la qualité et la stabilité du réseau électrique face à l'augmentation du nombre de charges et de la puissance électrique (passage aux fortes puissances), il sera nécessaire de concevoir des systèmes avec des architectures encore plus complexes, voire des architectures en rupture. Cela implique donc de disposer de méthodologies d'ingénierie capable de développer ces nouveaux systèmes, qui seront capables de gérer la complexité liée aux évolutions des systèmes.

La disparition des réseaux hydrauliques et pneumatiques va demander la conception de nouvelles solutions architecturales afin de répondre à de nouvelles exigences de fiabilité et d'opérabilité sur le réseau électrique. Par exemple, classiquement dans les avions, il n'existe que 2 niveaux de tension : 115/200 VAC et 28 VDC. Pour ces niveaux de tensions, les architectures du système de génération et de distribution électriques sont stables et connus. Cependant, dans le cas des avions plus électriques, des niveaux de tension plus élevés sont ajoutés : 230/400 VAC (*High Voltage AC – HVAC*) et ± 270 VDC (*High Voltage DC – HVDC*). Comme indiqué précédemment (section 1.1.2.1), les charges sont alimentées à des niveaux de tensions différents selon leur nature et leur niveau de consommation. Avec l'ajout de niveaux de tensions, le réseau électrique devra donc se doter de nouveaux convertisseurs « hautes tensions » afin de couvrir une gamme plus large de tensions tout en permettant de mutualiser la conversion pour un ensemble de charges demandant le même niveau de tension. L'ajout de ces convertisseurs va modifier et créer de nouvelles interfaces dans les systèmes, qu'il faudra être capable de maîtriser. Cela pose également la question de l'intégration de ces équipements électriques au sein du réseau

⁸ <https://www.ecologique-solidaire.gouv.fr/elisabeth-borne-preside-conseil-recherche-aeronautique-civile-travailler-filiere-aviation-durable>

⁹ <http://aerorecherchecorac.com/programme/>

¹⁰ https://www.ecologique-solidaire.gouv.fr/sites/default/files/DGAC_AVIATION_CIVILE_387_special_bourget.pdf

¹¹ <https://www.aiaa.org/propulsionenergy/program/eats>

¹² https://www.see.asso.fr/site-manifestation/22807_mea2019

électrique. D'autres verrous sont également à lever, tels que la gestion thermique, la compatibilité électromagnétique et le critère économique (Giraud, 2014). De plus, en termes d'ingénierie, les données échangées (commandes de vols, statuts des composants,...) via le réseau de communication interne et externe vont également évoluer. Ces données permettent aux systèmes avioniques¹³ de réaliser un ensemble de tâches pour assurer le bon fonctionnement de l'avion (Kemayo, 2014) comme : contrôle des commandes de vol, gestion des alarmes, gestion du carburant et de l'électricité dans l'avion... En effet, avec l'augmentation en taille du réseau électrique, la quantité de données échangées entre les différents systèmes va également augmenter.

La gestion de tous ces nouveaux flux, interfaces, composants va fortement impacter les méthodologies d'ingénierie. Or, ces dernières semblent déjà à la limite de leurs capacités en terme d'efficacité, d'agilité et de communication (L. Wang et al., 2016). Il apparaît donc nécessaire de faire évoluer ces pratiques afin de pouvoir répondre aux futurs défis méthodologiques lancés par l'augmentation de la complexité des systèmes. Dans le contexte commercial très concurrentiel de l'aéronautique, il apparaît même obligatoire de répondre à ces défis afin d'améliorer la réactivité pour les réponses aux appels d'offres ainsi que pour réduire le « *time to market* ».

1.1.3. Systèmes complexes et systèmes critiques : définitions préliminaires

Dans cette thèse, nous parlerons de systèmes complexes (section 1.1.2) mais également critiques puisque le système doit continuer de fonctionner même en cas de pannes. Les systèmes considérés suivent donc les définitions données dans la suite de cette section.

Avant tout il convient de définir la notion de système, au sens de (Fiorèse & Meinadier, 2012) :

Par définition, tout système est constitué d'un ensemble d'éléments dont la synergie est organisée pour répondre à une finalité dans un environnement donné.

Cette définition se doit d'être complétée pour l'IS, puisqu'elle peut s'appliquer pour deux sortes de systèmes (Fiorèse & Meinadier, 2012) :

- « Système à faire »

Le « système à faire » qui est initialement un concept, une abstraction, le résultat concret de sa réalisation est un « produit » (produit-système) ayant les caractéristiques d'un système et répondant à une définition qui en précise toutes les caractéristiques techniques, de production, d'exploitation, de maintenance, ...

- « Système pour faire »

Le « système pour faire » qui met en place les ressources humaines et techniques pour organiser, exécuter et coordonner toutes les activités qui conduisent de l'énoncé de la

¹³ « Ensemble des moyens informatiques et électroniques embarqués à bord d'un avion (capteurs, actionneurs, calculateurs, logiciels et bus réseaux) permettant aux systèmes de remplir les différentes fonctionnalités avion » (Kemayo, 2014) .

finalité à la réalisation et à la mise à disposition du système à faire (ou système étudié). Ce système est organisé sous forme d'un ou plusieurs projets.

Le « système pour faire » contribue à développer le « système à faire ». Pour cela, il s'appuie sur l'IS qui propose des démarches génériques pour développer des systèmes. Cela permet de définir les tâches à réaliser afin de tenir le planning (Figure 4).

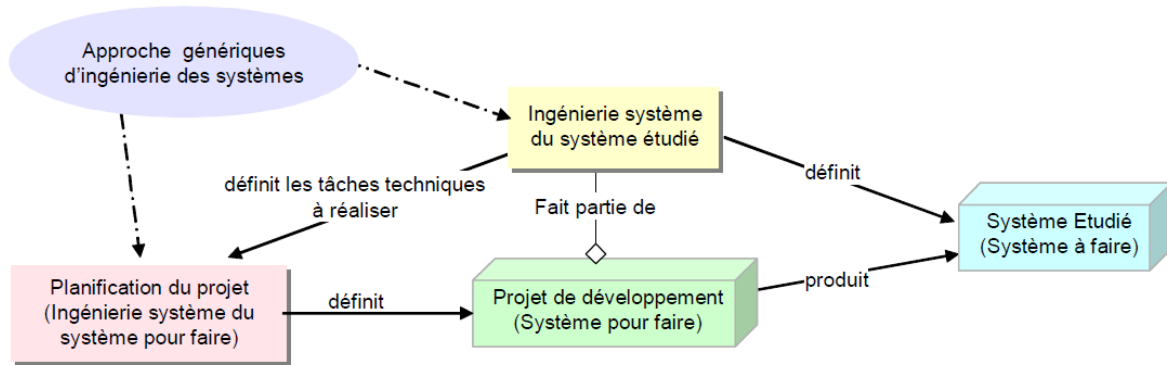


Figure 4. Relations entre IS, système à faire et système pour faire, extrait de (Fiorèse & Meinadier, 2012)

Les systèmes considérés sont également dits « complexes » et cette complexité peut-être définie au sens de (Fiorèse & Meinadier, 2012) :

La complexité des systèmes est souvent caractérisée, au-delà de la complexité intrinsèque des composants et de leur variété, par la complexité du réseau d'interactions, d'où proviennent des comportements émergents tant intentionnels (les synergies recherchées) que non intentionnels, ces derniers pouvant être néfastes et difficiles à prévoir et maîtriser (résonances, interférences, interblocages...).

Les systèmes sont également considérés comme critiques, nous considérons ici la définition donnée par (Cressent, 2012) :

Un système sera critique si de son bon fonctionnement dépendent des enjeux importants, tant en termes financiers, humains que logistiques. La conception d'un système critique va donc de pair avec la définition de fortes contraintes de sûreté de fonctionnement qui valideront ou non l'aspect dangerosité du système.

Bien que le contexte de la thèse induise l'étude de systèmes de distribution électrique d'aéronefs, nos travaux ont pour objectif d'être applicables au-delà du domaine aéronautique à une large variété de systèmes complexes, issus de domaines variés tels que l'automobile, le ferroviaire, l'énergie...

1.2. Transition vers de nouvelles pratiques d'ingénierie

1.2.1. Documents vs modèles

Les systèmes présentent un nombre toujours croissant de fonctionnalités et sont plongés dans un environnement contraignant (Madni & Sievers, 2018). La conception de ces systèmes de plus en plus complexes implique des phases d'ingénierie plus

longues et des coûts plus élevés pendant la phase de vie de conception d'un projet. Ces impacts négatifs sont accentués par l'application actuelle « centrée sur les documents » des processus d'ingénieries au sein des entreprises (Carroll & Malins, 2016). Dans cette section nous mettrons en perspective les approches actuelles d'ingénierie orientées « documents » (section 1.2.1.1) puis nous expliciterons les avantages et la manière de réaliser une transition vers de nouvelles approches orientées « modèles » (section 1.2.1.2).

1.2.1.1. Approches centrées sur les documents

Traditionnellement, l'application de l'IS dans les industries (aéronautique, automobile...) est basée sur les documents. Cette approche consiste à générer des documents textuels de spécifications et de conception qui sont ensuite échangés entre les clients, les utilisateurs, les développeurs, les testeurs... L'approche documentaire repose généralement sur une architecture documentaire générique qui permet de guider la génération de documents au bon niveau d'abstraction. Des études et des analyses en ingénierie sont effectuées et documentées par des disciplines différentes pour évaluer et optimiser des conceptions alternatives et pour allouer les exigences de performance. L'analyse peut être étayée par des modèles d'analyse individuels pour les performances, la fiabilité, la sécurité, les propriétés de masse et d'autres aspects du système.

Bien que les équipes de développement travaillent sur des modèles métiers (adaptés à des pratiques de spécialistes), ceux-ci sont « isolés » puisque la communication avec d'autres équipes se fait historiquement au travers de documents écrits en langage naturel. Des outils de dessin sont également utilisés pour capturer la conception du système, tels que les diagrammes de flux fonctionnels. Mais ces diagrammes sont également stockés sous forme de fichiers distincts et inclus dans la documentation de conception du système. Cela implique un travail considérable de compréhension, de validation et de vérification de cohérence. En effet, les informations partagées par ces documents doivent être cohérentes, complètes et uniques, afin de s'assurer que le système développé est en phase avec la documentation et ainsi éviter la non-satisfaction des besoins clients.

Ces documents sont principalement constitués d'exigences, qui forment le corps spécifiant du système à développer. Pour donner un ordre de grandeur, une spécification clients peut contenir plusieurs milliers d'exigences, on atteint même plusieurs dizaines de milliers d'exigences pour un projet complet ! Or, au-delà du nombre d'exigences à gérer, l'utilisation du langage naturel comporte de nombreux problèmes (Barlas et al., 2017) comme la verbosité (beaucoup de texte, ce qui rend les documents trop volumineux et difficile à comprendre), la fusion de plusieurs exigences différentes en une seule, le mélange et la confusion sur le niveau d'abstraction ou le point de vue (fonctionnelle, non-fonctionnelle...) et enfin un manque de clarté. Sur ce dernier point, l'une des causes du problème réside souvent dans le fait que les auteurs et les lecteurs doivent avoir la même compréhension d'un concept. Or, ces derniers disposent rarement du même système de connaissance ou bien du même historique sur les concepts employés, ce qui peut donc conduire à des ambiguïtés. L'auteur de (Jackson, 1995) fournit un exemple éclairant en s'appuyant sur les panneaux

d'avertissements à l'entrée d'escaliers mécaniques. En effet la phrase « *Dogs must be carried on this escalator* »¹⁴ peut être interprété d'au moins quatre façons différentes :

1. Tous les chiens devraient avoir la chance d'être porté sur cet escalier mécanique ;
2. Cet escalier mécanique est réservé aux porteurs de chien ;
3. Vous ne pouvez pas porter votre chien sur les autres escaliers mécaniques ;
4. Si vous utilisez l'escalier mécanique avec un chien, vous devez le porter.

L'approche basée sur les documents présente donc certaines limites. Tout d'abord, la répartition des différentes données (exigences, données de conception, d'analyses, de test...) sur plusieurs documents rend l'évaluation et le maintien de l'ensemble difficile. Ainsi, l'effort de compréhension d'un aspect particulier du système, la réalisation des évaluations de traçabilité ou d'analyses d'impact s'en trouvent complexifiées. Le manque de contrôle du périmètre de conception rend également hasardeuse la réutilisation des exigences système et des informations de conception pour une évolution ou une variante. Ces limitations peuvent entraîner des inefficacités et des problèmes de qualité, qui se manifestent souvent lors de l'intégration et des tests, ou pire, après la livraison du système au client.

Les limitations de l'ingénierie basée sur les documents, pour maîtriser la complexité croissante des systèmes à développer (cf section 1.1.2.2), impactent directement les performances de l'ingénierie qui servent à évaluer l'efficacité d'ingénierie. En ce sens, le tryptique « Qualité-Coût-Délai » fournit des pistes pour améliorer l'efficacité d'ingénierie : moins d'itérations, moins de dépenses non nécessaires, temps de livraisons réduits,... Il est également possible de s'intéresser à la performance via une autre logique ternaire « Produit-Projets-Acteurs », proposée par (Bonjour & Dulmet, 2006) pour le pilotage des activités de conception. Cette vision permet d'étendre les approches de conception, souvent limitées au système-produit, à l'utilisation de l'ingénierie au système-projet et au système-acteur.

L'utilisation de documents pour l'ingénierie provient de l'exigence contractuelle client demandant à un fournisseur de livrer un ensemble de documents formalisés (livrables) concernant la spécification ou la description du système à faire. Actuellement les modèles systèmes ne sont pas considérés comme des livrables clients d'où la difficulté à pénétrer les approches employées par les ingénieurs. En effet, ces derniers n'étant pas tenus de fournir ces modèles, ils représentent une charge de travail supplémentaire. L'un des freins à l'utilisation de plus de modèles en aéronautique est majoritairement culturel puisque l'ARP 4754A (*Aerospace Recommended Practice – Guidelines For Development Of Civil Aircraft and Systems*) (SAE, 2010) qui fait office de standard pour les développements de systèmes aéronautiques civils n'empêche pas leur utilisation. Il faut cependant noter que la plupart des modèles dits « certifiés » sont en réalité des modèles réalisés à partir d'un système déjà certifiés.

¹⁴ « Tous les chiens doivent être portés sur cet escalier mécanique » (notre traduction)

1.2.1.2. Ingénierie Système Basée sur les Modèles

Pour appréhender et concevoir le « système à faire », l'utilisation de modèles est une pratique usuelle dans tous les types d'industrie. Les approches basées sur les modèles sont d'ailleurs des pratiques standards dans les domaines électrique et mécanique par exemple. Dans ce manuscrit, on retiendra la définition suivante de la notion de modèle, au sens de (Fiorèse & Meinadier, 2012) :

Les modèles sont des représentations construites dans un objectif défini, donnant du système une vue partielle, à un niveau de granularité ou de détail donné permettant d'en étudier certaines de ses caractéristiques.

Ces modèles peuvent être de différents types en IS (Figure 5). Les modèles prédictifs sont grandement utilisés chez SEP en thermique, mécanique... L'objectif est d'introduire des modèles pour communiquer ainsi que des modèles normatifs formalisés. Dans ce mémoire, les modèles considérés sont des modèles système (modèle central du système), dont le concept est présenté plus loin dans cette sous-section.

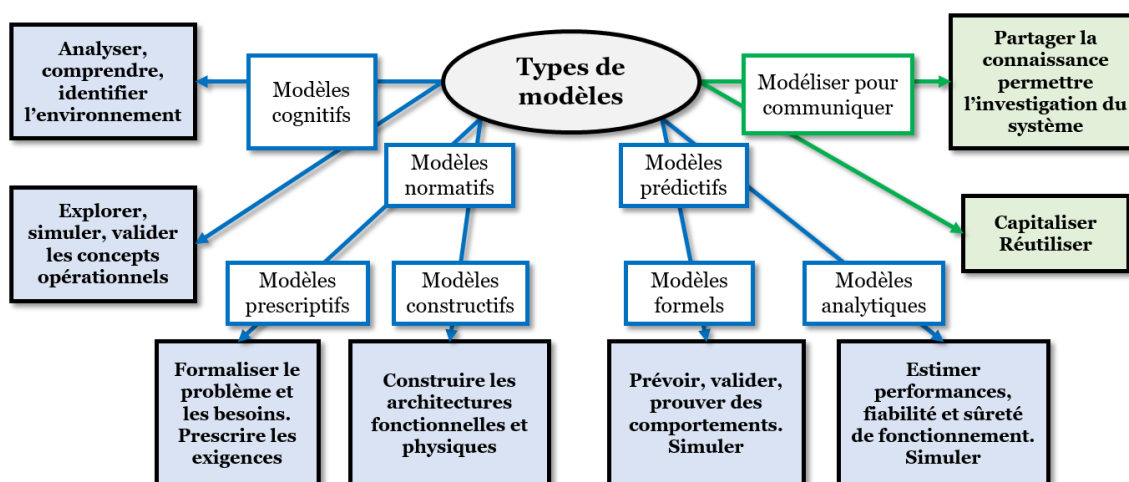


Figure 5. Typologie des modèles IS (adapté de l'AFIS)

Afin de gérer la complexité toujours croissante des systèmes, de maintenir la cohérence des informations et d'assurer leur traçabilité durant l'ingénierie, la communauté IS a développé une approche méthodologique de développement centrée sur les modèles : l'Ingénierie Système Basée sur les Modèles (ISBM). Dans ce mémoire, une méthodologie en ISBM (*Model Based Systems Engineering – MBSE*) est définie au sens de (Estefan, 2008) :

A MBSE methodology can be characterized as the collection of related processes, methods and tools used to support the discipline of systems engineering in a “model-based” or “model-driven” context.

Les approches d'ISBM sont destinées à faciliter les activités d'IS, à améliorer la communication et la précision des spécifications, de la conception, de l'intégration du système et de la réutilisation des artefacts du système. Le résultat des activités d'IS est un modèle cohérent du système (c'est-à-dire un modèle « système »), l'accent étant mis

sur l'évolution et le raffinement du modèle à l'aide de méthodes et d'outils basés sur des modèles.

D'après (Estefan, 2008), le mot « méthodologie » est souvent confondu avec le terme « processus ». Afin de distinguer les différentes notions sous-jacentes, les définitions suivantes sont utilisées (Figure 6).

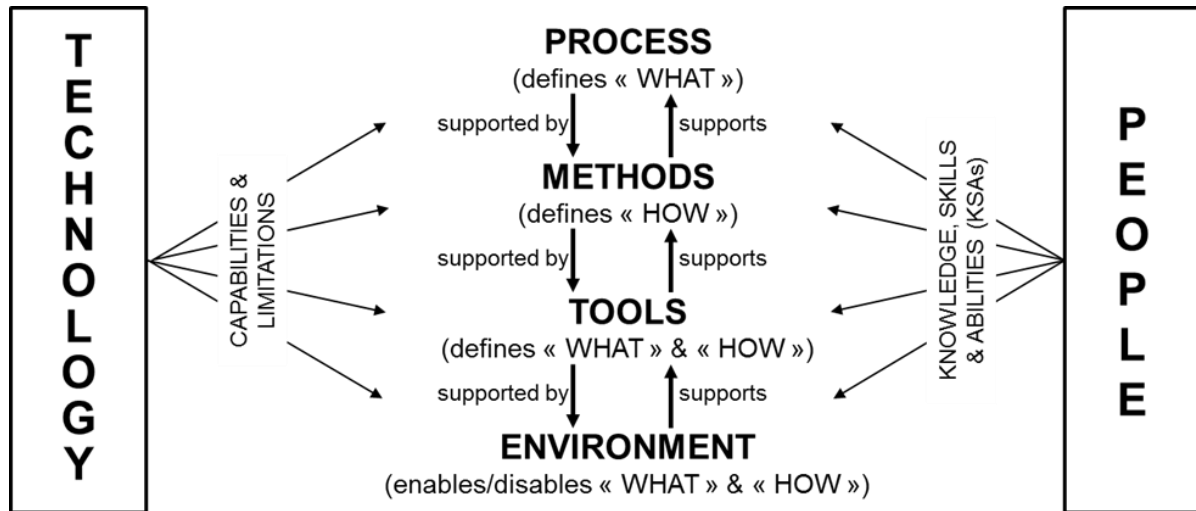


Figure 6. Relations entre Processus, Méthodes, Outils et Environnement (extrait de (Estefan, 2008))

Cette figure distingue donc :

- Le « **processus** » (*process*) : correspond à une séquence logique de tâches, réalisées pour atteindre un objectif particulier. Un processus définit ce qu'il faut faire (« QUOI »), sans préciser « COMMENT » chaque tâche est réalisée ;
- La « **méthode** » (*method*) : regroupe des techniques pour réaliser des tâches. Elle définit le « COMMENT » faire de chaque tâche. De manière récursive, chaque « méthode » est également un processus. Le « COMMENT » à un niveau d'abstraction devient le « QUOI » pour le niveau d'abstraction du niveau suivant ;
- L'« **outil** » (*tool*) : est un instrument qui, suivant une méthode spécifique, améliore l'efficacité de la tâche à réaliser. Un outil doit permettre de faciliter la réalisation du « COMMENT » ;
- L'« **environnement** » (*environment*) : correspond au contexte social, culturel, personnel, physique... dans lequel est plongée la méthodologie. Il doit intégrer et supporter l'utilisation de l'outil et de la méthode ;
- La « **technologie** » (*technology*) : qui va permettre de libérer ou de limiter certaines capacités. Elle va permettre d'aider les efforts en ingénierie mais il faut également prendre en compte le fait qu'elle puisse y faire obstacle ;

- Les « **individus** » (*people*) : dont les connaissances, les compétences et les capacités doivent être prises en compte afin de les faire correspondre aux besoins de la méthodologie.

Le paradigme d'IBSM promeut une approche d'IS qui se concentre sur la création et l'exploitation de modèles systèmes comme la source principale d'échanges d'informations entre les ingénieurs, en lieu et place de documents écrits en langage naturel. La définition d'ISBM suivie dans ce mémoire sera celle popularisée par l'*International Council on Systems Engineering (INCOSE)* avec la *MBSE Initiative* (Estefan, 2008) :

The formalized application of modelling to support system requirements, design, analysis, verification and validation activities beginning in the conceptual design phase and continuing throughout development and later life cycle phases.

L'application d'une ISBM vise donc à remplacer une ingénierie centrée sur les documents. Les équipes sont alors toutes centrées autour d'un seul modèle système où chaque information est unique (Figure 7). Ce modèle système est généralement créé dans un outil de modélisation et contenu dans un répertoire dédié. Une des principales utilisations du modèle système est de concevoir un système qui répond aux exigences système et d'allouer les exigences aux composants du système. Le modèle système comprend les interfaces et les interactions des composants, ainsi que les fonctions que les composants doivent réaliser. Les exigences textuelles pour les composants peuvent également être capturées dans le modèle et reliées aux exigences du système. Il reste toujours possible de générer des documents à partir de ce modèle, pour assurer la transition des pratiques d'ingénierie. L'objectif, une fois la transition vers l'ISBM effectuée, est de disposer d'un modèle système qui soit spécifiant. Bien que cet objectif ne fasse pas partie des objectifs de cette thèse, elle en constitue une perspective essentielle.

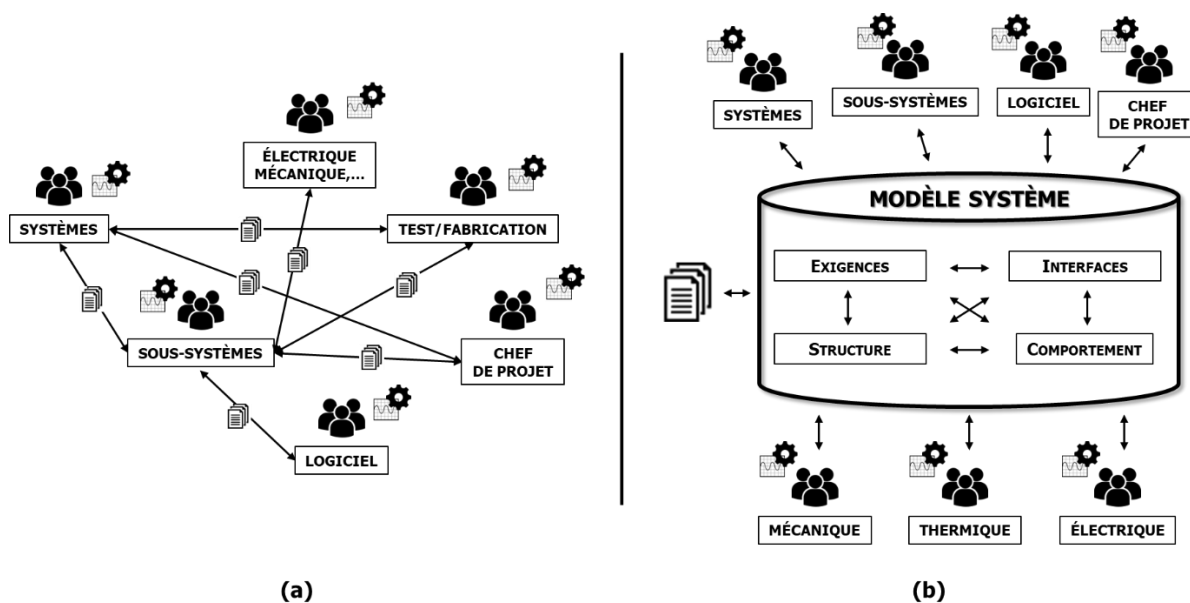


Figure 7. Ingénierie centrée : sur les documents (a), versus, sur les modèles (b)

Les éléments du modèle système sont stockés dans un répertoire dédié et représentés sur des diagrammes par des symboles graphiques. L'objectif est de permettre au modélisateur de créer, modifier et supprimer des éléments de modèle et de décrire les relations entre ces différents éléments. Les informations de spécification, de conception, d'analyse précédemment capturées dans les documents sont désormais capturées dans le répertoire du modèle système. Le modèle peut donc être visualisé dans des diagrammes, des tableaux ou dans des rapports générés en interrogeant le répertoire du modèle. Chaque vue permet de comprendre et d'analyser différents aspects d'un même modèle système. Par exemple, la Figure 8 montre différentes vues d'un modèle système, chacune des vues représentant des aspects spécifiques définis dans le langage de modélisation SysML (*System Modeling Language*) (OMG, 2017a). Ces aspects incluent la structure, le comportement, les exigences, et les paramètres.

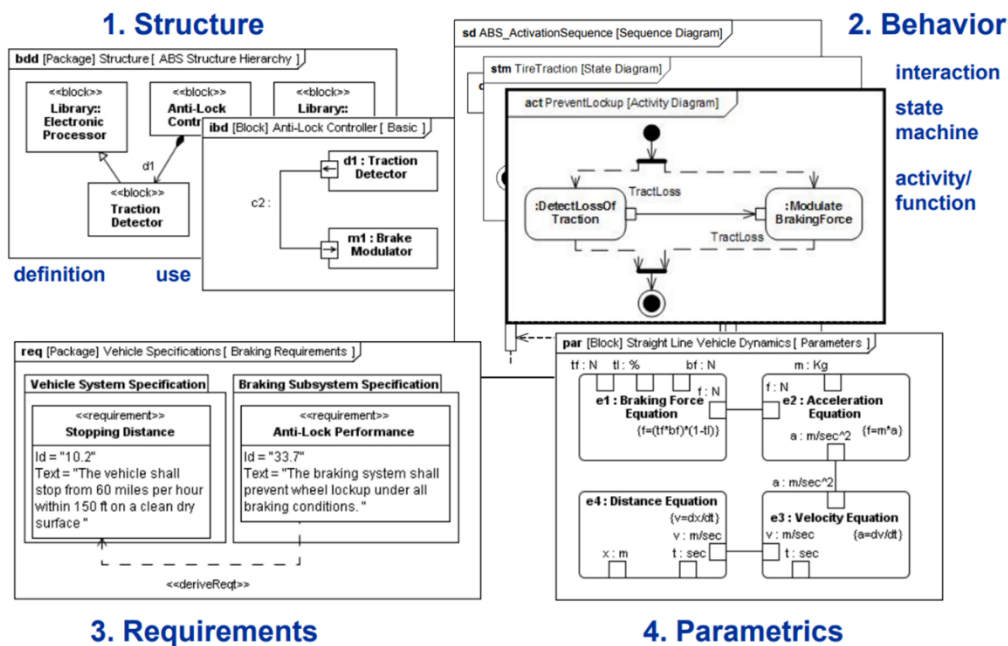


Figure 8. Exemple de modèle système dans SysML, extrait d'un tutoriel de l'INCOSE sur le SysML¹⁵

1.2.2. Transition vers l'ISBM

Les modèles ont été utilisés dans les approches orientées documents, mais ils ont été limités à un périmètre très restreint d'analyse ou de description du système, et plutôt représentés sous la forme de diagrammes. De plus, ces diagrammes étaient isolés et n'ont pas été intégrés dans un modèle cohérent et global du système. De même, les activités de modélisation ne faisaient pas partie des processus d'ingénierie des systèmes et leurs places n'est toujours pas complètement définies à l'heure actuelle. La transition vers l'ISBM représente donc un changement de paradigme, où la maîtrise des données du système ne se fait plus dans les documents, mais dans le modèle système.

L'intérêt de l'ISBM est de répondre à une partie des limitations de l'approche orientée « documents », en fournissant des moyens rigoureux pour capturer les

¹⁵ www.omg.sysml.org/INCOSE-OMGSysML-Tutorial-Final-090901.pdf

exigences système, les informations de conception, d'analyse et de vérification, ainsi qu'en facilitant la maintenance et la communication de ces informations. Parmi les avantages potentiels de l'ISBM, citons les suivants (Friedenthal et al., 2008) :

- Amélioration de la communication
 - Compréhension commune du système au sein de l'équipe de développement et avec les autres parties prenantes
 - Capacité à intégrer des vues du système de plusieurs points de vue
- Réduction du risque de développement
 - Validation continue des exigences et vérification de la conception
 - Estimations de coûts plus précises
- Amélioration de la qualité
 - Exigences plus complètes, sans ambiguïté et vérifiables
 - Traçabilité plus rigoureuse entre les exigences, la conception, l'analyse et les tests
 - Intégrité de conception améliorée
- Amélioration de la productivité
 - Analyse d'impact plus rapide des exigences et des modifications de conception
 - Réutilisation des modèles existants
 - Réduction des erreurs
 - Génération automatique de documents
- Facilitation du transfert de connaissance et de savoir-faire
 - Capture des informations de spécification et de conception dans un format générique et classer en bibliothèque

L'ISBM peut donc fournir un cadre rigoureux aux processus de spécification et de conception lorsque les bonnes méthodes et outils sont implémentées et utilisées. Cependant, les auteurs de diverses enquêtes (Chami et al., 2018; Huldt & Stenius, 2018; Vogelsang et al., 2017) rapportent que les industriels peinent encore à adopter ces nouvelles méthodologies. En effet, de nombreux inhibiteurs subsistent en raison :

- des **niveaux de maturité sur les processus** : dans certains cas, le passage à l'ISBM implique également le passage à l'IS, ce qui demande de faire évoluer les pratiques d'ingénierie sur deux aspects différents ;
- de la **maîtrise et l'application des méthodes** : idem que sur les processus ;

- de **l'utilisation des outils** : en fonction des méthodes à appliquer, l'interface ou le langage de modélisation utilisée seront à personnaliser (long et coûteux) ;
- du **processus de transformation** : résistance au changement des individus, qui demande un long travail d'accompagnement et de formation. Difficultés dans l'environnement à financer la transformation, à mettre à disposition des outils et formations adéquats.

La transition vers de nouvelles pratiques d'ingénierie demande donc un effort important. Afin de faciliter cette transition, et notamment réduire la résistance au changement, la sous-section suivante se propose d'analyser la capacité de l'humain à assimiler de l'expérience pour adapter ses futures réactions. La compréhension de ce mécanisme de capitalisation et de réutilisation fournira un guide à suivre pour faciliter la transition vers l'ISBM.

1.2.3. Facilitateurs d'adoption de nouvelles pratiques d'ingénierie

Pour une adoption plus large de l'ISBM, plusieurs avancées semblent nécessaires en termes d'organisation, de méthodes et d'outils afin de réduire la résistance au changement. Il est donc nécessaire de développer des moyens pour améliorer l'adoption de l'ISBM par les ingénieurs. En ce sens, il est possible de s'inspirer de la notion de « simplexes » d'ingénierie, qui s'appuie sur le concept de simplicité défini par (Berthoz, 2009) comme :

La simplicité telle que je l'entends est l'ensemble des solutions trouvées par les organismes vivants pour que, malgré la complexité des processus naturels, le cerveau puisse préparer l'acte et en projeter les conséquences. Ces solutions sont des principes simplificateurs qui permettent de traiter des informations ou des situations, en tenant compte de l'expérience passée et en anticipant l'avenir. Ce ne sont ni des caricatures, ni des raccourcis ou des résumés. Ce sont de nouvelles façons de poser les problèmes, parfois au prix de quelques détours, pour arriver à des actions plus rapides, plus élégantes, plus efficaces.

Les êtres vivants, et notamment les êtres humains sont plongés dans un monde ou dans des environnements d'une très grande complexité. Face à cela, il a été nécessaire pour eux de créer des solutions pour résoudre des problèmes d'interactions ou de perceptions afin de réagir vite ou de résoudre rapidement des problèmes. C'est en cela qu'Alain Berthoz entend la simplicité, et il explique que cette notion s'appuie sur un ensemble de ressources disponibles dans le corps humain¹⁶. Il cite par exemple les mécanismes neuronaux d'anticipation (par exemple : pour frapper une balle, le joueur de tennis anticipe sa position par rapport à sa raquette), ou encore les différents modèles internes dont le cerveau dispose et qui lui permettent d'effectuer, par exemple, des simulations mentales d'actions effectuées par autrui. Il cite également le système émulateur du cerveau qui donne l'impression qu'un rêve est réel alors qu'il y a une absence de réalité. Le corps humain a donc à sa disposition des mécanismes, des modèles de simulation qui lui permette d'analyser son univers propre (voir notion

¹⁶ Séminaire au Collège de France (2012) : www.college-de-france.fr/site/jean-paul-laumond/seminar-2012-02-06-17h00.htm

d'« *Umwelt* »¹⁷), et donc de mesurer des variables pertinentes de celui-ci afin de l'aider à construire des solutions.

À partir de ces ressources (mécanismes d'anticipation, simulations mentales,...) s'ajoutent cinq principes qui structurent les processus de « simplification ». Ce sont des principes fondamentaux qui rendent compte de l'inventaire de procédés « simples » tirés de l'observation des rapports a priori complexes qu'entretiennent les êtres vivants avec le monde réel. Il s'agit de l'inhibition des réflexes par les centres cérébraux des fonctions exécutives (principe d'**inhibition**) ; la sélection des informations pertinentes pour l'action (principe de **spécialisation**) ; la prédiction de la probabilité d'un événement futur sur la base de la mémoire (principe d'**anticipation**) ; le détour par des moyens auxiliaires (principe du **détour**) ; le contrôle d'une source d'information par une deuxième ou le changement des points de vues (principe de **coopération**).

Il est possible de transposer ces principes en ingénierie et de voir l'influence de l'expérience sur la simplification. Par exemple, il est aisé de deviner que le principe d'anticipation sera plus performant chez un ingénieur senior, qui aura eu le temps d'affiner ses modèles internes. Chez les ingénieurs, l'action de réutiliser les connaissances et le savoir-faire provenant de leurs expériences ou de projets antérieurs signifie que les ingénieurs ont appliqué ces principes simplificateurs. Ils ont donc construit des simples à la fois sur le système d'intérêt (qui est le système dont le cycle de vie est considéré) ou sur les activités d'ingénierie système (qui visent à développer le système d'intérêt). Cependant, cela signifie que ces simples sont conservés dans l'esprit de chaque ingénieur, et qu'il n'est pas possible à un ingénieur junior d'accéder directement aux simples d'un ingénieur sénior. Il est donc nécessaire de travailler à la formalisation de ces simples dans le but de les partager, afin qu'ils puissent être réutilisés par d'autres ingénieurs. En d'autres termes, les « bonnes pratiques » d'ingénieries sont donc des simples et leur diffusion au sein d'une entreprise est capitale pour pérenniser les savoir-faire et disposer d'un corpus de connaissance commun.

Afin de trouver des solutions face à la complexité des systèmes à développer, il est nécessaire pour l'ingénieur de simplifier. S'il n'arrive pas à le faire lui-même parce que l'écart avec les pratiques actuelles d'ingénierie est trop important, il apparaît alors qu'il faut le guider dans l'application des principes de simplification. En ce sens, lui fournir des guides de modélisation peut l'aider à gérer la complexité des modèles en lui faisant profiter du retour d'expérience des projets précédents (capitalisation) et en lui indiquant les informations pertinentes à remplir (réutilisation). Cela permettra aux ingénieurs de s'approprier la méthodologie d'ISBM et de l'adapter à leurs besoins.

La notion de simplicité décrit donc une démarche intellectuelle implicite réalisée par l'ensemble des êtres humains. Afin de favoriser la démarche de simplicité, il est nécessaire de disposer d'un vocabulaire commun des artefacts à manipuler en ISBM. Pour cela la sous-section suivante, va fournir les définitions qui seront suivies dans le reste du manuscrit.

¹⁷ Concept théorisé par Jakob von Uexküll selon lequel chaque espèce vivante a son univers propre, à quoi elle donne sens, et qui lui impose ses déterminations.

1.2.4. Définition des artefacts de modélisation

Dans ce manuscrit, les différentes définitions considérées pour les différents artefacts de modélisation vont être adaptés au contexte d'ingénierie de SEP (cf section 4.1) :

- De manière générale

Vision opérationnelle : regroupe les vues qui décrivent l'environnement du système, notamment via ses interactions et ses interfaces avec celui-ci. (CESAMES)

Vision fonctionnelle : regroupe les diagrammes du système qui décrivent des vues statiques, et dynamiques (entrées, sorties) du système sans faire référence à ses futurs composants (sans se référer à aucun choix technologique ou à aucune solution choisie). C'est une analyse interne du système qui reste à un niveau abstrait. (CESAMES)

Vision organique : regroupe les vues qui permettent l'analyse interne concrète (white box) du système en s'appuyant sur des modèles de bas niveaux qui sont associés aux composants du système. (CESAMES)

- Vision Opérationnelle

Parties prenantes : Partie ayant un droit, une part ou une prérogative qui fait que le système ou certaines de ses propriétés doivent satisfaire les besoins ou les attentes de cette partie. (ISO15288)

Environnement : L'environnement (naturel ou artificiel) dans lequel le système d'intérêt est utilisé et soutenu. (INCOSE 2010)

Contexte opérationnel : Milieu dans lequel un système opère. (INCOSE 2010)

Cycle de vie : Evolution d'un système étudié dans le temps, depuis sa conceptualisation jusqu'à son retrait. (ISO15288)

Cas d'utilisation : Description de l'usage attendu d'un système vu sous l'angle de l'un de ses utilisateurs. (AFIS)

Scénario opérationnel : Séquence descriptive de la dynamique des flux échangés entre le système et son environnement pour un cas d'utilisation donné. (X-ATIS)

- Vision Fonctionnelle

Fonction système : Action attendue du système ou produit pour répondre à un besoin de l'environnement. (AFIS)

Fonction technique : Réponse à la mise en œuvre d'une ou plusieurs fonctions systèmes. (X-ATIS)

Mode : Condition de fonctionnement du système (mode de fonctionnement automatique, assisté, dégradé, en démarrage, en maintenance,...). (AFIS)

Scénario fonctionnel : Séquence descriptive de la dynamique des flux échangés entre le système et son environnement pour une fonction système ou technique.

- Vision Organique

Configuration : Ensemble fixé de composants du système qui correspond à un ou plusieurs modes de fonctionnement. (X-ATIS)

Composant logique : Organe abstrait du système défini comme un regroupement d'une ou plusieurs fonctions techniques allouées à l'issue de la conception fonctionnelle. Un composant logique peut être matériel, ou applicatif mais reste suffisamment abstrait pour laisser la possibilité d'identifier des alternatives de solutions physiques. (X-ATIS)

Composant physique : Organe concret du système défini par l'allocation de un ou plusieurs composants logiques. Un composant physique (matériel ou applicatif) est une réponse à un composant logique, il a au moins les mêmes propriétés. (X-ATIS)

Scénario organique : Séquence descriptive de la dynamique des emplois possibles ou des réactions attendues des constituants du système. (X-ATIS)

La section suivante va définir la démarche qui a guidé nos travaux dans l'environnement industriel spécifique de cette thèse, pour expliciter le mécanisme de simplification afin de faciliter l'adoption de l'ISBM.

1.3. Formalisation du problème industriel

1.3.1. Environnement industriel

1.3.1.1. D'un point de vue interne (entreprise)

Le contexte industriel de la thèse a fortement évolué entre le début du contrat¹⁸ et la rédaction de ce manuscrit. En effet, plusieurs changements sont venus impacter le déroulement du travail de thèse. En début de contrat, l'entreprise d'accueil était Zodiac Aero Electric, l'une des filiales du groupe aéronautique Zodiac Aerospace. À l'époque, le contexte industriel portait sur la mise en oeuvre et le partage d'une pensée système (*System Thinking*) au sein des équipes de l'entreprise, afin d'accompagner la transformation du métier d'équipementier à systémier. Zodiac Aero Electric, en tant que sous-traitant, ne devait plus seulement fournir un équipement que le client (l'avionneur) intégrait dans son système (avion). Dorénavant, le sous-traitant doit effectuer le développement d'un sous-système en pensant à l'intégration finale sur le système. En d'autres mots, le périmètre de responsabilité de développement évolue, la responsabilité est transférée de l'avionneur vers le sous-traitant. L'objectif était alors d'introduire l'ISBM dans les futurs projets et au sein des équipes de développement afin d'accompagner cette transformation du métier.

Fin 2018, une fusion-absorption entre les groupes aéronautique Safran et Zodiac Aerospace eu lieu. Elle aboutira à la création de l'une des plus importantes entreprises aéronautiques mondiales. La spécificité du groupe est de développer la plupart des systèmes et sous-systèmes d'un aéroplane. L'environnement d'ingénierie dans lequel la thèse avait débuté change, puisqu'une partie des parties prenantes du système de distribution électrique font désormais partie de la même entreprise. Il

¹⁸ Le contrat de la thèse CIFRE a démarré le 2 janvier 2017.

devient alors nécessaire de faire évoluer l'ISBM hors de l'ancien périmètre de Zodiac Aero Electric et de l'ouvrir aux autres entités du groupe afin de travailler de manière collaborative et ainsi optimiser la conception des systèmes.

De plus, à cette période, l'ISBM est un sujet qui commence à dépasser le simple périmètre de l'entreprise. En effet, des clients comme Airbus et Boeing expriment le souhait de se servir de la modélisation système comme d'un moyen d'échange pour la spécification. L'ISBM n'est donc plus seulement un moyen d'améliorer l'efficacité de l'ingénierie en interne, elle devient une obligation commerciale pour les futurs projets. L'ouverture des données de spécification et de conception capturées grâce à l'ISBM ne pose pas de problème entre les entités d'un même groupe. Cependant, entre un client et son fournisseur la question est totalement différente puisque la question de la propriété intellectuelle devient centrale. Il est alors nécessaire de trouver le moyen de satisfaire à la fois les aviateurs et les autorités de certification, tout en implémentant des fonctionnalités avec la qualité et le niveau de sécurité requis par la norme ARP4754A (SAE, 2010).

Dans ce cadre, il est indispensable de construire et de maintenir les modèles des architectures de systèmes satisfaisant les exigences au cours des différentes itérations d'ingénierie (internes ou liées à une évolution du besoin exprimé par le client). Il faut partager ces référentiels entre les différents métiers impliqués dans l'ingénierie des systèmes de distribution électrique. Il est également indispensable de développer des fonctionnalités permettant le partage des modèles et la protection de la propriété intellectuelle entre un fournisseur et son client.

1.3.1.2. D'un point de vue externe (retour d'expérience)

Il apparaît que la tendance actuelle à l'adoption des méthodologies d'ISBM n'ait pas suffisamment de sens pour que les ingénieurs fassent le saut vers ces nouvelles approches, comme le soulignent de nombreuses enquêtes sur le sujet (Chami et al., 2018; Huldt & Stenius, 2018; Murray, 2012; Vogelsang et al., 2017; White & Mesmer, 2019). Les inhibiteurs régulièrement évoqués concernent le changement culturel, la mauvaise perception des bénéfices, la durée et les coûts d'apprentissage ainsi que la mise en place de la démarche. En effet, ces inhibiteurs conduisent à des frustrations (manque de moyens, compétences,...) ou des incompréhensions (ratio bénéfices par rapport au temps de modélisation perçu comme bas), ce qui augmente la résistance au changement.

Les premières adoptions des approches ISBM sont souvent effectuées très rapidement et de manière assez « brutes ». Les aspects capitalisation, réutilisation, maturation ne sont pas pris en compte, ce qui se traduit par un faible retour sur investissement pour les équipes de développement. Dans le meilleur des cas, des actions de capitalisation ont lieu après la tentative d'adoption d'une approche d'ISBM. Cependant, le retour sur investissement pour les pratiques d'ingénierie reste faible. De plus, la capitalisation du savoir-faire conduit à la création de « briques », mais la confiance dans ces artefacts ne sera pas assez élevée pour les réutiliser (Figure 9).

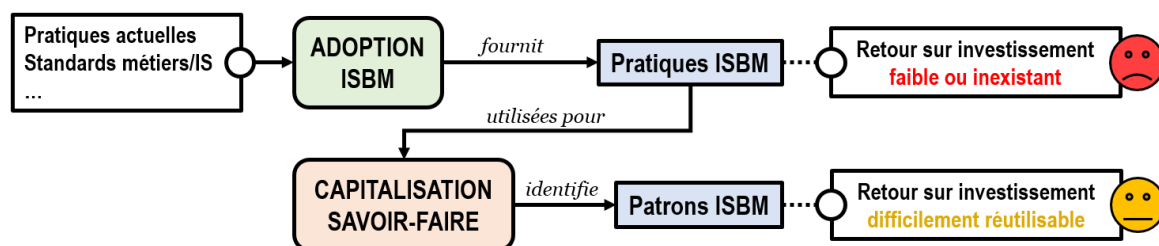


Figure 9. Tendance générale d'adoption des méthodologies ISBM (avec capitalisation)

Dans nos travaux, nous estimons donc que ces approches ne permettront pas de faciliter la transition vers l'ISBM. En effet, cette transition correspond à une séquence qui doit suivre les actèmes définis par (Vogel, 1988). Cette séquence se décompose en trois actèmes : ouverture, réalisation, clôture (Figure 10).

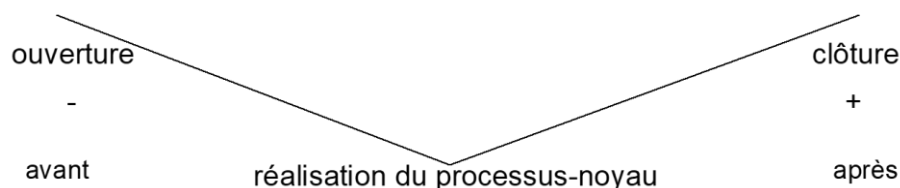


Figure 10. Patron de séquence au sens de (Vogel, 1988)

Les approches résumées dans la Figure 9 ne sont pas pro-efficientes puisqu'elles ne suivent pas la séquence logique des trois actèmes proposées. La tentative d'adoption directe ne s'intéresse qu'à la réalisation, tandis que la capitalisation a posteriori ne s'intéresse qu'à la réalisation et à la clôture. Or, cette dernière fournit des éléments (« Patrons ISBM ») qui sont en réalité des artefacts à utiliser en entrée de la réalisation, donc en ouverture.

Contrairement à ces tendances, l'hypothèse de la thèse est donc de considérer que le processus d'adoption doit prendre en compte le savoir-faire de l'ingénieur en ouverture, avant de se lancer dans la modélisation (réalisation). De ce fait, la modélisation fournira des retours d'expériences (après la clôture) qui permettront de nourrir les pratiques d'ISBM (Figure 11).

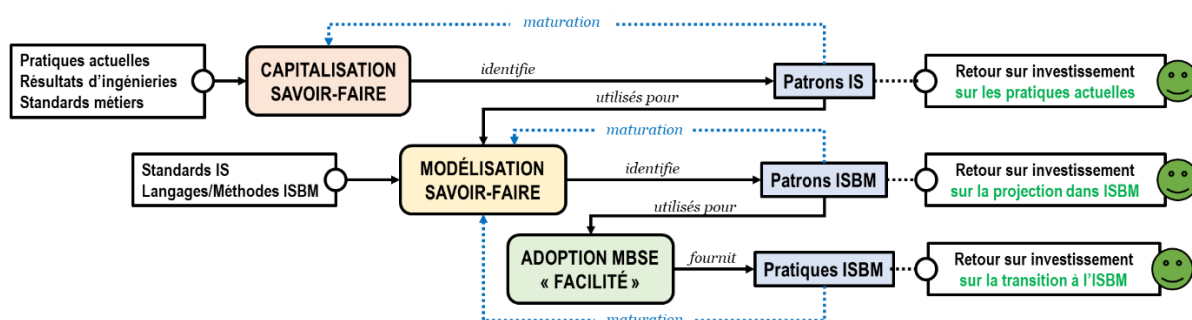


Figure 11. Approche défendue dans cette thèse pour l'adoption des méthodologies ISBM

Dans l'approche proposée, le processus commence par l'extraction de patrons d'Ingénierie Système. En effet, ces patrons existent déjà dans la manière de travailler des ingénieurs, mais ne sont pas formalisés (section 1.2.3). L'objectif est ici d'identifier les patrons qui répondent le mieux aux besoins des équipes d'ingénierie. Cette étape présente l'avantage de fournir une forme de capitalisation sur les pratiques actuelles

en formalisant le savoir-faire métier. Les patrons qui ont le plus de valeur ajoutée seront donc modélisés afin de fournir des patrons d'ISBM. L'intérêt de cet étape est d'identifier les artefacts de modélisation nécessaires pour traduire les patrons d'IS en patrons intégrables dans une approche d'ISBM. Cette étape permet de fournir des patrons de modélisation « clés en main » qu'il est plus facile d'utiliser lors de l'application d'une approche d'ISBM. Cela permet de faciliter l'adoption des méthodologies d'ISBM puisque l'utilisation de l'approche a plus de valeur ajoutée. En effet, les équipes de développement retrouvent leur manière de faire précédente mais « encapsulée » dans des patrons, qui les guideront pour modéliser et spécifier leur système.

À ce titre, il convient d'introduire une notion permettant de désigner les artefacts d'ingénierie qui disposent d'une valeur ajoutée pour les équipes de développement. Dans nos travaux, cette notion s'apparente à un actif au sens comptable, tel que défini dans l'article 211-1 du Plan comptable général de l'Autorité des Normes Comptables¹⁹ :

Un actif est un élément identifiable du patrimoine ayant une valeur économique positive pour l'entité, c'est-à-dire un élément générant une ressource que l'entité contrôle du fait d'évènements passés et dont elle attend des avantages économiques futurs.

Il est ainsi possible de transposer cette définition dans le contexte de l'IS et de l'ISBM :

Un « actif d'Ingénierie Système » est un élément identifiable du savoir-faire d'ingénierie d'une entreprise ayant une valeur d'usage et économique positive pour une entreprise, c'est-à-dire un élément générant un artefact d'ingénierie ou de modélisation issue du savoir-faire de l'entreprise et dont elle attend des avantages d'usages et économiques futures.

La sous-section suivante développe la thèse principale défendue dans ce manuscrit. Les verrous à lever sont explicités ainsi que les différentes étapes qui sont envisagées pour y répondre.

1.3.2. Enjeux du changement de pratiques d'ingénierie

L'un des principaux défis à relever lors d'un changement de paradigme (dans notre cas celui des pratiques d'ingénierie) est celui de réussir l'accompagnement culturel des équipes de développement. Dans le contexte de nos travaux, il s'agit d'accompagner la transition des pratiques d'ingénierie d'approches basées sur les documents vers des pratiques d'ISBM. Afin que l'écart entre la situation actuelle et la situation visée ne soit pas trop élevé, nos travaux estiment qu'il est nécessaire de ne pas remettre en cause le savoir-faire de l'ingénieur.

Pour cela, il est nécessaire d'extraire et de capitaliser le savoir-faire dans la situation initiale, afin de le convertir dans un format adéquat pour le réutiliser dans la situation visée (Rossi et al., 1997). Il est nécessaire de démontrer aux utilisateurs finaux

¹⁹ Règlement ANC N°2014-03, version consolidée au 1er janvier 2019 : http://www.anc.gouv.fr/files/live/sites/anc/files/contributed/ANC/1.%20Normes%20fran%C3%A7aises/Recueils/Recueil%20comptable%20entreprises/2019/PCG_2019.pdf

que les nouvelles pratiques d'ingénierie sont toujours destinées à les aider à concevoir leur système (simplexification, section 1.2.3), même si leur routine quotidienne évolue. En effet, contrairement aux pratiques d'ingénierie qui peuvent changer, le savoir-faire de l'ingénieur est durable et demeure la clé de la réussite pour le développement de systèmes. À cet effet, nos travaux ont montré la pertinence des patrons pour la capture des actifs d'IS et leur valorisation par la réutilisation (Quentin Wu et al., 2018).

Dans nos travaux, nous visons donc à démontrer que :

« *La transition vers une démarche d'ISBM est facilitée par la formalisation et la réutilisation de savoir-faire d'ingénierie.* »

Cependant, dans cette thèse, l'objectif n'est pas de rechercher le meilleur format de capitalisation pour permettre la réutilisation. En effet, nous faisons l'hypothèse de départ que l'utilisation de la notion de « patrons » permettra de remplir cette mission.

La transition vers une démarche d'ISBM est facilitée par la formalisation et la réutilisation de savoir-faire d'ingénierie sous forme de patrons.

En ce sens:

- Cette thèse doit définir le savoir-faire d'ingénierie à capitaliser et à réutiliser (Bouffaron, 2016; Gouyon et al., 2013) dans un cadre d'ISBM (Retho, 2015; Sirin, 2015) ;
- Cette thèse doit définir les propriétés et caractéristiques (niveaux d'abstraction, paramétrisation,...) du concept de patron pour la conception et le développement des systèmes complexes ;
- Cette thèse doit définir le cadre méthodologique permettant d'associer aux patrons de conception plusieurs vues (exigences, fonctions, architecture, comportement exécutable, dysfonctionnel ...) sur un même objet, partagé par les différents métiers de l'ingénierie ;
- Cette thèse doit définir des critères et une démarche de sélection, puis d'association de composants en bibliothèque, guidée par les patrons de conception et les exigences exprimées à différents niveaux (système, équipement, composant) ;
- Cette thèse doit définir une métrique permettant d'évaluer la maturité du processus de valorisation d'actifs d'IS.

En ce sens, un certain nombre de verrous sont à lever :

- Comment capitaliser du savoir-faire d'ingénierie ?
- Comment valoriser des actifs d'ingénierie ?
- Comment réutiliser des actifs d'ingénierie ?
- Comment déterminer le niveau de maturité (confiance) dans les modèles ?

- Comment déterminer le niveau de maturité (confiance) dans le processus de réutilisation ?

Nous allons répondre à ces verrous par l'étude des axes de travaux suivants:

- La formalisation de patrons méthodologiques utilisables à différents niveaux systèmes pour la mise en œuvre des processus d'Ingénierie Système, avec pour objectif de standardiser les bonnes pratiques d'ingénierie et faciliter la coopération entre les différentes parties prenantes d'ingénierie ;
- La formalisation de patrons d'ingénierie utilisables dans le cadre de systèmes critiques distribués, pour standardiser les architectures et faciliter la réutilisation de savoir-faire;
- Le développement d'une méthode de sélection et d'utilisation de patrons et de briques élémentaires (modèles) en bibliothèque pour satisfaire un référentiel d'exigences à différents niveaux système ;
- Le développement d'une échelle de maturité du processus de valorisation d'actifs d'ingénierie pour évaluer les efforts à réaliser afin d'améliorer l'efficacité de la capitalisation et de la réutilisation.

Conclusion

La thèse présentée dans ce manuscrit s'intéresse à la transition vers des pratiques d'ISBM dans le cadre du développement de systèmes complexes critiques. Afin d'apporter, d'une part, une aide à l'adoption des approches d'ISBM et, d'autre part, de fournir des guides méthodologiques ou métiers, les travaux présentés ici ont pour objectif, de :

- Formaliser le savoir-faire d'ingénierie sous la forme de patrons de conception ;
- Définir une méthodologie de capitalisation et de réutilisation de patrons ;
- Évaluer la maturité du processus de valorisation d'actifs d'IS.

Une des premières questions à laquelle nos travaux doivent répondre concerne la pertinence de l'utilisation de la notion de « patrons » pour la valorisation d'actifs d'IS. Cela nécessite que le formalisme soit capable de supporter les processus de capitalisation et de réutilisation de savoir-faire. Ce problème est adressé dans le Chapitre 2, qui présente un état de l'art sur l'évolution des pratiques d'ingénierie et l'utilisation des patrons pour la valorisation des actifs d'IS dans des approches ISBM.

Chapitre 2.

État de l'art et positionnement scientifique

Sommaire du chapitre

2.1. L'évolution des pratiques de valorisation d'actifs d'ingénierie	43
2.1.1. Capitalisation et réutilisation d'actifs d'ingénierie.....	43
2.1.2. Diversité des activités de réutilisation en Ingénierie Système	47
2.1.3. Vers la réutilisation de modèles pour le transfert de connaissances et de savoir-faire	53
2.2. L'utilisation de patrons pour la valorisation des actifs d'ingénierie	54
2.2.1. Historique sur l'utilisation des patrons	54
2.2.2. Utilisation de patrons en Ingénierie Système	56
2.3. Utilisation de patrons dans le cadre de la transition vers l'Ingénierie Système Basée sur les Modèles	63
2.3.1. Réutilisation de modèles dans le cadre de l'adoption de méthodologies d'Ingénierie Système Basée sur les Modèles.....	63
2.3.2. Utilisation de patrons en Ingénierie Système Basée sur les modèles	65
2.3.3. Limites de patrons en Ingénierie Système Basée sur les Modèles	67

Introduction

L'objectif de ce chapitre est de montrer que le concept de « patron » fourni un formalisme fonctionnel et pertinent pour répondre à la nécessité de valoriser les actifs d'ingénierie en vue de favoriser la transition vers l'ISBM et également d'accélérer les cycles d'ingénierie. Ce chapitre propose donc une étude bibliographique permettant d'analyser les besoins méthodologiques émergents, associés à l'évolution des pratiques d'ingénierie. Il propose d'autre part d'analyser l'utilisation des patrons pour le processus de valorisation des actifs d'IS, qui permettra d'accompagner la transition vers l'ISBM.

2.1. L'évolution des pratiques de valorisation d'actifs d'ingénierie

Les pratiques actuelles d'ingénierie ne permettent plus d'appréhender convenablement la complexité des systèmes (Corbets et al., 2018). Ce constat impose donc de développer de nouvelles approches d'ingénierie capables de répondre à cet enjeu. Cependant, cela implique de remettre en cause les pratiques actuelles afin d'améliorer l'efficacité de l'ingénierie et de répondre aux besoins des clients dans un marché compétitif. Pour autant, certaines pratiques courantes chez les ingénieurs ne sont pas à remplacer mais à adapter. La pratique qui sera étudiée dans ce mémoire est la valorisation d'actifs d'ingénierie qui permet, à partir d'expériences passées, d'accélérer et d'améliorer l'efficacité des nouveaux cycles d'ingénierie. Bien qu'à l'origine ce soit une pratique informelle et individuelle, il est rapidement apparu important de l'organiser et de la systématiser afin de répondre aux enjeux économiques modernes. La formalisation de documents, décrivant les connaissances et le savoir-faire de l'ingénieur, a longtemps été le format principal de la valorisation des actifs d'ingénierie au sein des entreprises. Cependant, il apparaît désormais nécessaire de faire évoluer cette pratique, afin qu'elle puisse accompagner la transition d'une approche d'ingénierie système basée sur les documents vers une approche d'ISBM (cf section 1.2).

2.1.1. Capitalisation et réutilisation d'actifs d'ingénierie

Traditionnellement, le savoir-faire d'une personne se construit et se nourrit d'expériences passées. Ces expériences accumulées sont agrégées chez chaque individu dans une « archive mentale ». Cela permet à chaque individu de répondre de manière efficace face à un problème identique ou nouveau, par adaptation des expériences accumulées. En effet, la différence fondamentale entre connaissance et savoir-faire, est que la première fournit uniquement des solutions à des problèmes, ou des réponses à des questions, tandis que le savoir-faire fournit à la fois des solutions mais également une manière de construire ces solutions (Gzara et al., 2003). C'est pourquoi ce mémoire traitera spécifiquement du savoir-faire d'ingénierie qui sera également nommé « actif d'ingénierie » (cf section 1.3.1.2) afin d'en souligner sa valeur et la nécessité de mettre en place un processus de valorisation de ces actifs.

La valorisation d'actifs sous tend deux processus, l'un de formalisation (1), l'autre de transfert (2). Afin d'explicitier ces derniers il est supposé qu'un instant T correspond à un contexte de départ, et qu'à l'instant T+k, le processus de formalisation

ou de transfert est terminé. Dans le cas du processus (1), il y a un passage de l'instant T à $T+k$ en formalisant l'actif d'ingénierie. Dans le cas du processus (2), le passage à $T+k$ se concrétise lorsque l'actif a été partagé et transféré à un autre individu.

Il s'avère que la création et le transfert (pour la valorisation) des actifs d'ingénierie sont facilement réalisables quand l'ensemble des informations d'un projet sont appréhendables par une seule personne (situation 1a et 2a de la Figure 12). Or, avec l'augmentation de la complexité des systèmes, il est de plus en plus long et difficile de créer et de transférer de manière efficace ces actifs d'ingénierie. En raison des coûts et délais qui vont contraindre les développements en entreprise, des situations d'incomplétude apparaissent (Figure 12) :

- situation 1b) : incomplétude lors de la création;
- situation 2b) : incomplétude lors du transfert.

Dans les sous-parties b), on observe que la haute complexité empêche une formalisation et un transfert efficaces des savoir-faire d'ingénierie, créant de ce fait un obstacle pour leurs futures réutilisations.

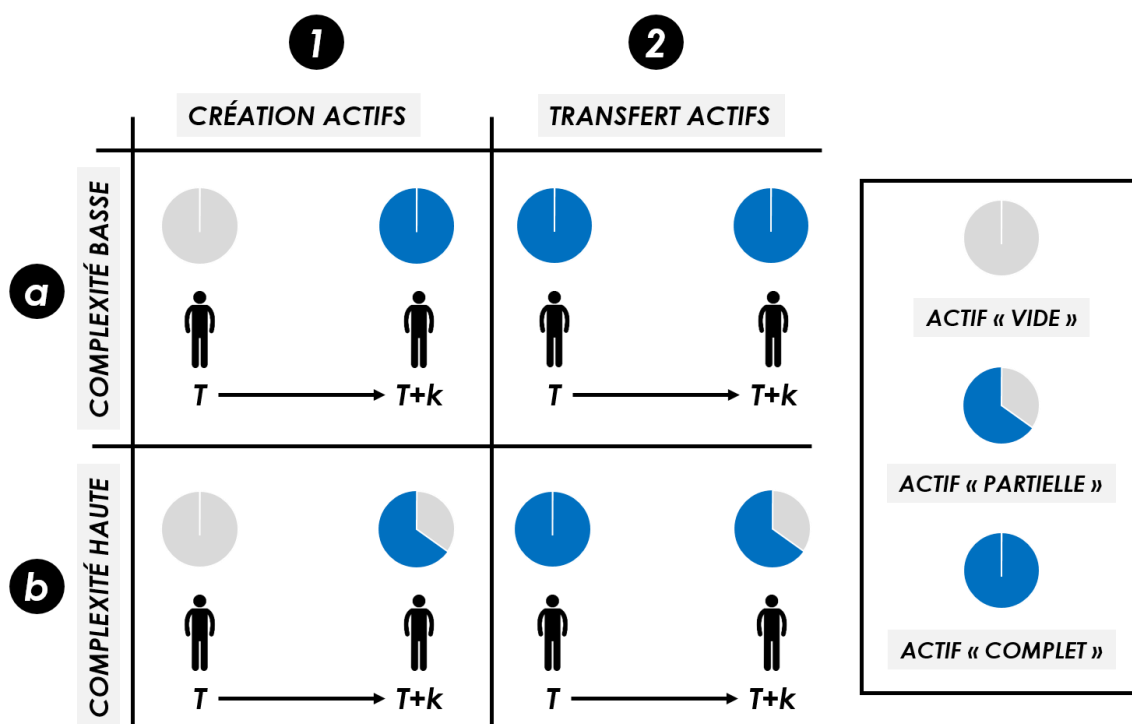


Figure 12. Création et transfert d'actifs d'ingénierie à différents niveaux de complexité

Cette figure fait apparaître l'existence de différents niveaux de complexité, qui ne sont pas des catégories clairement définies. Une manière de considérer ces catégories consiste à s'intéresser à la capacité de réutilisation selon le niveau de complexité donné. Dans ce cas, en émettant l'hypothèse que la complexité va continuer à augmenter avec le temps, il apparaît nécessaire de définir et de développer de nouvelles manières de transférer les connaissances et le savoir-faire. Dans les sous-sections suivantes (2.1.1.x), des niveaux de complexité sont définis en fonction des moyens de transfert de connaissances et de savoir-faire utilisés. Une synthèse est donnée en sous-section 2.1.1.4 par le Tableau 1.

2.1.1.1. Niveau 1 : complexité « basse » – oralité

À ce niveau de complexité, la transmission de connaissances et de savoir-faire se fait à l'oral, notamment par discussions (retours d'expériences), interviews, ou dessins. Ces échanges oraux entre individus sont intéressants car extrêmement flexibles. En effet, il est très facile pour un instructeur d'adapter son discours, afin de transmettre l'actif d'ingénierie souhaité.

Cependant, dès que la complexité du système augmente et qu'il devient nécessaire de transmettre de grands volumes de connaissance et de savoir-faire, alors l'oralité ne suffit plus. En effet, la mémoire immédiate d'un individu ne lui permet pas de retenir de grandes quantités d'informations lors d'une conversation. Pour pallier à ce problème il est donc nécessaire de mettre en place un engagement plus important entre les instructeurs et les apprenants sur de longues périodes de temps.

2.1.1.2. Niveau 2 : complexité « intermédiaire » – écriture

Lorsque l'oralité ne suffit plus, c'est souvent le texte qui devient le moyen de transfert de connaissances et de savoir-faire privilégié. L'avantage du texte est la pérennité d'un document, qui reste même si une personne quitte l'entreprise. De plus, une fois le document écrit, l'engagement de l'instructeur peut diminuer. Ces documents regroupent tout l'historique de l'ingénierie et sont enrichies au fur et à mesure.

Cependant, pour certains documents comme ceux de spécification, l'explosion de la taille de ces documents ou bien les problèmes d'interprétations du langage naturel sont des freins à la bonne transmission du savoir-faire. Il faut également s'assurer que ces documents soient accessibles, que leurs objectifs soient clairs et surtout à jour ! C'est le cas des documents décrivant les processus d'ingénierie ou fournissant des templates de travail pour l'ingénieur.

2.1.1.3. Niveau 3 : complexité « élevée » – modélisation

Lorsque la complexité continue d'augmenter, il est préférable de privilégier l'utilisation de modèles (section 1.2.1). Ce que nous appelons modèles ici, ne sont pas des « simples » dessins, ils sont en effet plus expressifs que des documents textuels, mais ils sont surtout moins ambigus que leurs homologues car des règles de syntaxe et de sémantique formalisent leur construction et interprétation (OMG, 2017a). En effet, à ce niveau de complexité, la taille et le nombre de documents demandent une quantité de travail très importante pour assurer la cohérence des informations entre toutes les équipes d'ingénierie et entre toutes les itérations réalisées dans le cycle de vie d'un système (Kalawsky, O'Brien, et al., 2013). C'est pour cette raison que des approches comme l'Ingénierie Système Basée sur les Modèles (ISBM) se développe, avec pour volonté de proposer un modèle unique, qui se retrouve au cœur des activités d'Ingénierie Système et qui regroupe l'ensemble des artefacts utilisés dans le projet afin d'en assurer la cohérence (Holt et al., 2015). De plus, l'utilisation de modèles facilite un examen et une exploration précoce des caractéristiques logiques et comportementales de l'architecture, via par exemple des simulations comportementales dynamiques (Ge et al., 2014).

2.1.1.4. Niveaux de complexité et moyens de transfert

Le Tableau 1 fournit une classification des différents niveaux de complexité des systèmes, et s'appuie pour cela sur les moyens de transfert de connaissances et de savoir-faire, en synthétisant les corrélations pouvant exister entre les trois niveaux de complexité et les différents moyens de transfert de savoir-faire. Pour chaque moyen de transfert, deux usages sont définis. D'une part, un usage « brut » (fond blanc), qui correspond à l'utilisation de savoir-faire et de la connaissance en « one-shot », non réutilisable. D'autre part, un usage « en réutilisation » (fond gris, « réut. »), qui décrit des moyens de transfert dont l'intention est de transférer le savoir-faire de manière plus formelle afin de permettre une réutilisation dans différents contextes. Dans la ligne « modèle », la question posée souligne le manque d'approche de réutilisation formalisée bien que les approches de modélisation soient déployées au sein des organisations.

Tableau 1. Niveaux de complexité système et moyens de transfert

		Niveaux de complexité			
		Niv. 1	Niv. 2	Niv. 3	
Oral	Brut	Discussions Interviews Dessins	+	-	--
	Réut.	Présentations Cours	++	~	-
Texte	Brut	Commentaires Emails	+	+	-
	Réut.	Manuels Livres Documents Technique	++	+	~
Modèle	Brut	Utilisation de Modèles	++	++	+
	Réut.	Réutilisation de Modèles ?	++	++	++

Efficacité :	--	Très basse	+	Élevée
	-	Basse	++	Très élevée
	~	Correcte		

Le passage d'un niveau de complexité à un niveau supérieur se traduit par la perte d'efficacité d'un moyen de transfert par rapport à un autre. Ainsi, au niveau 1 de complexité, tous les moyens de transfert ont une efficacité élevée ou très élevée en raison de la relative simplicité du système. Le passage au niveau de complexité 2 correspond alors à l'impossibilité d'utiliser l'oral de manière suffisamment efficace. Par exemple, le texte se justifie lorsque la durée de transmission des connaissances et du

savoir-faire est trop long à effectuer pour un nouvel arrivant sur un projet. Il apparaît alors nécessaire de créer un référentiel structuré facilement partageable comme moyen de transfert afin d'éviter la mobilisation d'une personne. De même, le passage au niveau 3 correspond à la perte de sens du texte pour décrire le système. C'est le cas par exemple pour les cœurs électriques, où le nombre d'exigences explose et nécessite un travail long et complexe de mise en cohérence.

2.1.2. Diversité des activités de réutilisation en Ingénierie Système

La réutilisation permet de reprendre et d'appliquer du savoir-faire et des connaissances sans avoir besoin de traiter à nouveau l'ensemble des informations nécessaires ayant permis de produire ce savoir-faire ou ces connaissances. L'intérêt est multiple, notamment pour économiser du temps, de l'énergie et des ressources. En Ingénierie Système, de nombreux travaux de recherches se sont intéressés à cette pratique (Barter, 1998; Bollinger & Evins, 2015; Cloutier, 2008; Cook & Schindel, 2017; Gautam et al., 2007; Gzara et al., 2003; Haskins, 2005; Korff, 2013; G. Wang et al., 2010), et il apparaît à la lumière de ces travaux qu'il existe différentes manières de capitaliser des connaissances et du savoir-faire en vue de leur réutilisation. Ces approches appartiennent à un processus dit de « transfert de connaissances » (Majchrzak et al., 2004) et peuvent être distinguées en trois approches différentes qui ne sont pas exclusives :

- Opportuniste : lorsque le projet n'est pas prévu initialement avec des possibilités de réutilisation. C'est l'ingénieur qui est à l'initiative de la démarche, il s'agit donc du niveau le plus bas de maturité en terme de réutilisation (Rockley et al., 2003) car toute la démarche repose sur la bonne volonté de l'utilisateur ;
- Planifiée : lorsque le projet est développé avec des objectifs de réutilisation. Dans ce cas, la démarche de réutilisation a été intégrée dans le processus d'ingénierie de manière à ce que les éléments développés soient réutilisables (Rine & Sonnemann, 1998);
- Variante : lorsque le projet définit un ensemble de solutions avec des variantes ou options possibles. Par exemple, sur une ligne de produit (Le Put, 2016), il y a un modèle « coeur » commun et chaque produit est composé d'un ensemble d'options différentes (Niu et al., 2013).

Pour laisser la liberté de réutilisation à l'ingénieur tout en lui permettant d'être efficace dans son travail, il est nécessaire de le guider afin de rendre les éléments réutilisables pour les prochains projets et d'éviter que la réutilisation soit effectuée en « *one-shot* » sans capitalisation.

2.1.2.1. Réutilisation opportuniste

La réutilisation dite « opportuniste » correspond à une situation décrite par (Sen, 1997), où les actions de réutilisation :

« *are not performed in any sequence, rather as opportunities arise* »²⁰

²⁰ « ne suivent pas de processus définis mais à mesure que des opportunités se présentent » (notre traduction)

Cette approche implique que l'action de réutilisation se fait au bon vouloir de l'ingénieur, autrement dit, il n'est pas possible de prédire, ni de connaître les artefacts réutilisés. Cela induit donc une forte inconnue sur l'acte de réutilisation et sa réalisation. De plus, cela impacte également la performance de l'acte de réutilisation, car dans ce cas les bénéfices réalisés ne seront pas clairs (Rine & Sonnemann, 1998), puisque le périmètre d'action n'aura pas été défini. L'un des risques est notamment de générer des effets de bords qui pourront impacter négativement d'autres parties du système.

L'un des exemples les plus souvent cités de réutilisation opportuniste est l'action « copier – coller ». Elle s'applique sur un certain type d'artefacts d'ingénierie (par exemple : les exigences systèmes), qui une fois recopiés, sont adaptés afin de correspondre aux spécificités du projet en cours de développement (Le Put, 2016). Dans la communauté du logiciel, on peut retrouver un acte similaire, qui consiste à étendre le logiciel avec une fonctionnalité qui provient d'un logiciel tiers dont l'intégration et la réutilisation n'était pas prévue (Jansen et al., 2008). Bien que les auteurs présentent cette approche comme permettant des développements rapides, ils reconnaissent également le fait que la qualité du produit n'est pas aussi élevée que lors d'un développement prenant en compte des méthodes structurées pour la réutilisation. De la même manière, les auteurs de (Kotonya et al., 2010) utilisent cette approche sur des projets abandonnés ou annulés, et reconnaissent que, dans ce cas, l'identification d'éléments réutilisables est de la responsabilité du développeur et qu'il n'existe aucun garde-fou qui garantit que la réutilisation est faite de manière appropriée.

Des travaux de recherche ont mis en avant les causes racines de ces problèmes de réutilisation opportuniste. Une des analyses consiste à décrire les différents niveaux de connaissances d'un ingénieur sur un artefact d'ingénierie (Ye & Fischer, 2002). Cela permet d'illustrer les problèmes intellectuels qui peuvent survenir lors d'une réutilisation d'artefact d'ingénierie (Figure 13).

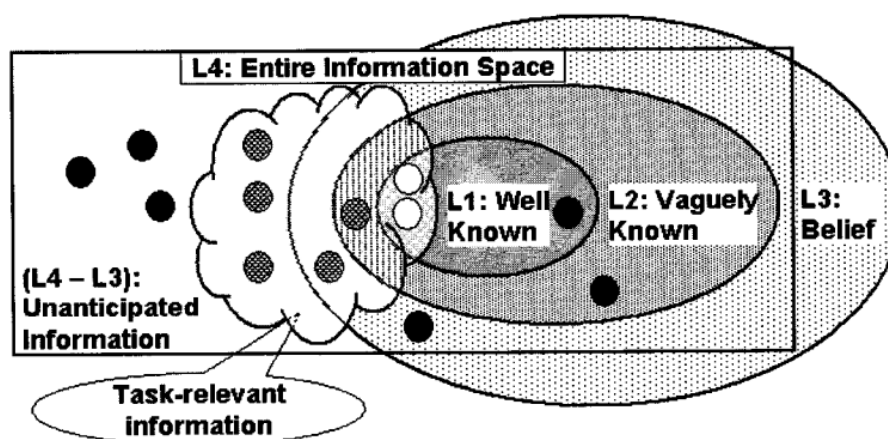


Figure 13. Les différents niveaux de connaissances sur un artefact d'ingénierie, extrait de (Ye & Fischer, 2002)

Cette description permet de comprendre ce qui peut pousser un ingénieur à démarrer un processus de réutilisation ou bien, au contraire, ce qui peut l'en empêcher. En effet, dans l'entière de l'espace d'information disponible, chaque individu possède son propre espace d'information. À l'intérieur de celui-ci, il existe différentes couches,

qui correspondent à une graduation allant de ce qui est bien connu (L1) à ce qui l'est moins (L2), puis à ce qu'on croit exister (L3), jusqu'à, finalement, ce qu'on ne pense même pas exister mais qui est bel et bien disponible (L4-L3). Ainsi, il apparaît que la zone de confort d'un individu pour engager un acte de réutilisation a plus de chances de fonctionner dans la zone L1 plutôt que dans L3, puisqu'une bonne connaissance de l'artefact d'ingénierie permettra de réduire les risques, car ils sont connus.

L'approche de réutilisation par opportunisme peut donc aider à développer rapidement des systèmes, par contre elle ne permet pas de garantir une bonne qualité de conception et ne semble pas pouvoir répondre à la nécessité de mettre en place des pratiques viables sur le long terme. Tel qu'il a été présenté dans cette sous-section, l'espace d'information de chaque partie prenante du projet doit être pris en compte pour assurer une réutilisation mature, viable et efficace. C'est ce qui est fait dans la réutilisation planifiée (cf sous-section suivante) et qui permet d'obtenir des bénéfices clairs.

2.1.2.2. Réutilisation planifiée

Comme présenté dans la sous-section précédente, l'ingénierie peut se faire « avec de la réutilisation », mais une réutilisation efficace doit être planifiée car elle nécessite une documentation et une conception appropriées (Kennedy et al., 2014), impliquant une ingénierie « pour la réutilisation ».

En ce sens, plusieurs travaux de recherche ont étudié cet aspect, comme l'approche dite « *set-based design* » qui s'intéresse au Système d'Intérêt et qui consiste en un changement de paradigme pour les industries. (Kennedy et al., 2014) décrivent une situation où les entreprises passent beaucoup de temps à concevoir leurs produits et à les tester à la fin du processus de développement. Ce qui se produit souvent, c'est que ces tests vont alors révéler des problèmes et cela va impliquer le développement d'une nouvelle version du produit à tester. Ce paradigme est appelé « *point-based design* » (Sobek II et al., 1999), car l'équipe de développement passe d'une solution « ponctuelle » à une autre, plus mature et plus proche des besoins du client à chaque nouvelle itération. (Kennedy et al., 2014) insistent sur le fait qu'une inversion du paradigme est nécessaire, et du point de vue des auteurs, elle est réalisable en transférant la charge de travail vers les phases amonts des activités d'ingénierie. Au lieu d'effectuer une importante phase de test à la fin du développement, les auteurs préconisent d'innover sur de petits tests qui peuvent aider à définir et à remettre en question les limites d'une technologie, afin d'établir un périmètre de conceptions possibles (Figure 14 – page suivante).

Les équipes d'ingénierie peuvent construire le système grâce à toutes les connaissances accumulées grâce à ces activités de maturation. C'est la raison pour laquelle le « *point-based design* » peut être considéré comme une « conception basée sur les documents », car les exigences et les spécifications ont été gérées à l'aide de documents en langage naturel, ce qui a entraîné de nombreuses itérations. Par conséquent, le « *set-based design* » vise à réduire le nombre d'itérations et à améliorer la prise de décision, en accumulant systématiquement des connaissances et en définissant un ensemble de modèles possibles (par maturation) avant de prendre des décisions clés. Cependant, même si les modèles peuvent appuyer la prise de décision

en présentant l'information nécessaire, ils doivent tout de même être bien conçus pour remplir ce rôle (Russell, 2012).

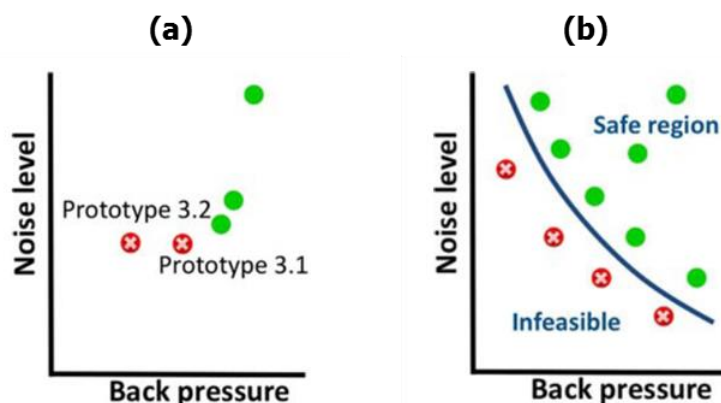


Figure 14. (a) Point-Based Design, (b) Set-Based Design extrait de (Kennedy et al., 2014)

Si l'approche précédente n'est pas à proprement parler une approche de réutilisation mais plutôt une approche de capitalisation, on peut citer l'approche via composants sur étagère (en anglais, *Components Off-The-Shelf* – COTS). Cette dernière peut être considérée comme approche de conception « diviser pour mieux régner », car elle introduit la notion de modularité tant au niveau logiciel qu'au niveau matériel du système. Elle consiste à décomposer un problème en sous-problèmes résolubles par des composants déjà existants. Par conséquent, (Hedman & Andersson, 2014) soulignent que les COTS peuvent être choisis et mis en œuvre pour des raisons techniques (temps de développement plus court), commerciales et organisationnelles (réduction des coûts de développement) ou stratégiques (accès à une technologie qui ne peut être développée à l'interne).

Cependant, dans la pensée système, le « tout » est plus que la somme de ses « parties ». Pour cette raison, les avantages du COTS sont contrebalancés par des enjeux d'intégration identifiés très tôt par (Boehm & Abts, 1999), et concernent : la fonctionnalité et la performance (ce qu'on attend de lui), l'interopérabilité (aucune norme n'existe), l'évolution des produits (risque de ne plus répondre aux besoins) et le comportement des fournisseurs (fausses promesses). Au-delà de ces préoccupations, il semble que la clé de l'utilisation des COTS réside dans la nécessité d'une méthode de sélection efficace, qui intègre les besoins et les situations des entreprises pour améliorer leur intégration. Par exemple, les outils COTS d'ISBM disponibles sur le marché ne supportent pas les mêmes méthodologies et n'offrent pas non plus la même expérience utilisateur en termes de convivialité, fonctionnalité, interopérabilité et support technique. C'est pourquoi, les auteurs de (Friedland et al., 2016) personnalisent leurs propres outils d'ISBM basés sur un COTS afin de répondre à leurs besoins.

Dans d'autres travaux, la réutilisation est centrée sur les activités d'ingénierie qui visent à produire le Système d'Intérêt. C'est le cas de certaines approches de réutilisation des exigences (Irshad et al., 2018). À titre d'exemple, dans les travaux de (Darimont et al., 2017), le processus proposé implique une bibliothèque de réutilisation locale pour chaque ingénieur et une bibliothèque de réutilisation partagée, gérée par un administrateur qui assure l'organisation et la maintenabilité de la

bibliothèque. Les ingénieurs peuvent proposer de transférer des artefacts de leur bibliothèque locale vers la base de données partagée afin de promouvoir la réutilisation, mais, ils peuvent également faire des recherches et instancier des artefacts dans leurs projets.

(Majchrzak et al., 2004) s'intéressent également à la réutilisation lors des activités d'ingénierie, et en particulier celles qui permettent aux ingénieurs d'innover. Au cours de six études de cas analysées, les auteurs ont pu identifier un processus de réutilisation en six étapes pour l'innovation. Ce processus de réutilisation consiste en trois actions principales : reconceptualiser le problème et l'approche, rechercher et évaluer les idées d'autres personnes pour les réutiliser, et enfin développer les idées sélectionnées. Leur étude souligne la nécessité pour les ingénieurs de rechercher les travaux d'autres personnes et de les évaluer pour créer des situations où ils sont plus susceptibles d'innover. Cette approche suppose que la capacité de trouver des idées potentiellement réutilisables est cruciale. Pour atteindre cet objectif, les structures organisationnelles doivent s'adapter pour, d'une part, permettre aux ingénieurs d'être conscients des approches de réutilisation et, d'autre part, créer de nouveaux rôles qui permettront d'animer une communauté qui favorise la réutilisation au sein des organisations.

Toujours sur les aspects réutilisation dans le processus d'ingénierie des exigences, le cadre de conception PABRE propose l'utilisation de patrons d'exigences logicielles (*Software Requirements Patterns*) comme moyen de capitaliser et de réutiliser les connaissances sur les exigences validées par des experts (Palomares et al., 2014). En effet, lorsque le langage naturel est utilisé, des problèmes apparaissent, par exemple, lors de la rédaction des exigences logicielles, tels que l'ambiguïté sur la compréhension, ou bien sur la gestion de la cohérence sur l'ensemble du document de spécification. Pour produire des spécifications de meilleure qualité, le cadre PABRE promeut la réutilisation des exigences par le biais du concept de patrons. Ce cadre est composé d'un métamodèle, d'une méthode de réutilisation des patrons, d'un catalogue de 111 patrons et d'un outil qui permet la gestion et l'utilisation du catalogue. Au sens des auteurs, un patron est un ensemble d'exigences qui poursuivent le même but dans un système en cours de développement. Cet objectif est ce sur quoi le client et l'ingénieur s'entendent. Une fois qu'ils se sont mis d'accord sur l'objectif, le patron permet de montrer les différentes manières pour l'atteindre, et sert de base pour améliorer l'ensemble des exigences s'il n'y a pas de consensus sur le patron.

Alors que le cadre PABRE se concentre uniquement sur la gestion des exigences, certains travaux de recherche considèrent l'ensemble du cycle de vie, et donc des activités d'ingénierie. C'est le cas du modèle COSYSMO, qui vise à évaluer le coût d'un développement. Cette extension, du *Constructive Cost Model* (COCOMO) développé par Barry Boehm (Boehm, 1984), est un modèle dédié à l'évaluation de l'effort d'ingénierie à fournir pour développer un nouveau système (Fortune & Valerdi, 2008). Le modèle fournit une aide à la décision pour les investissements, pour les analyses multi-critères, pour la gestion des risques, mais également une aide pour la planification budgétaire et stratégique, ainsi que pour mesurer l'amélioration des processus (Valerdi, 2005). COSYSMO se concentre sur l'ingénierie système, c'est pourquoi les phases du cycle de vie des systèmes ont été définies et se basent sur les

normes ISO/IEC 15288 et ANSI/EIA 632. (G. Wang et al., 2010) proposent d'étendre ce modèle pour inclure la capacité de réutilisation héritée d'anciens systèmes. Cette extension consiste à définir des catégories de réutilisation et des poids pour chacune de ces catégories. En partant de l'hypothèse que la réutilisation d'un élément doit permettre de réduire les efforts d'ingénierie, l'intérêt de la démarche est de pouvoir personnaliser ces poids en fonction des besoins de chaque entreprise, et ainsi permettre de calculer l'effort d'ingénierie à fournir selon que l'on crée ou que l'on réutilise un élément.

La réutilisation planifiée demande un fort engagement sur la définition de la méthode de conception intégrant de la réutilisation. Cela implique également d'avoir à sa disposition des artefacts d'ingénierie réutilisables, à un niveau de maturité suffisant. Cependant, cet effort supplémentaire à réaliser apporte un bénéfice plus important par rapport à une réutilisation opportuniste en terme de qualité, de temps de développement et de communication entre les ingénieurs.

2.1.2.3. Variance

Au-delà de la réutilisation opportuniste ou planifiée, une autre façon de réutiliser les artefacts de travaux antérieurs consiste à utiliser le concept de « variabilité », que l'on peut définir comme la capacité d'une caractéristique à varier (Le Put, 2016). Ces variabilités définissent donc le périmètre du domaine de réutilisation. Ce concept est bien adapté à l'Ingénierie des Lignes de Produits. Cette ingénierie ne concerne pas seulement le système, mais également un contexte plus global dans lequel sont considérés : les produits, les processus, la gestion et l'organisation de l'entreprise. Dans le contexte de la réutilisation dans les activités d'ingénierie, il est nécessaire de détailler les produits et les processus. En effet, les produits d'une ligne de produits sont créés depuis un produit générique (résultat d'un processus de capitalisation) et de ses applications (résultat d'un processus de réutilisation). Il apparaît donc nécessaire de définir des processus de capitalisation et de réutilisation afin de développer des plateformes à partir d'un produit générique (Chalé Góngora et al., 2014). Cela implique la nécessité de modéliser la variabilité, ce qui peut être fait en utilisant une approche d'ISBM.

Ainsi, de nombreux travaux de recherche semblent tirer parti des techniques de modélisation pour développer le concept de variance (Ryan et al., 2014). Cela permet de modéliser les options d'architecture ou, en d'autres termes, de modéliser des variabilités du produit. En effet, il n'y a pas que le modèle du système (exigences, fonctions,...) à considérer, car les techniques de modélisation doivent également permettre de capturer les caractéristiques communes et variables d'un système, de représenter la dépendance entre les artefacts (contraintes, variabilités), et de déterminer la combinaison réalisable de ces éléments du périmètre de la ligne de produits (Le Put, 2016). C'est pourquoi les techniques de modélisation sont pertinentes pour réduire la complexité en raison du nombre élevé de variabilités et de dépendances. Il est nécessaire de rendre explicites les combinaisons réalisables, pour faciliter l'analyse d'impact et pour capitaliser les combinaisons déjà explorées pour éviter de « réinventer la roue ». Pour exploiter ces techniques de modélisation, plusieurs langages ont été proposés, tels que FORE (*Family-Oriented Requirements Engineering*), FODA (*Feature-Oriented Domain Analysis*), OVM (*Orthogonal*

Variability Models), CVL (*Common Variability Language*) (Budiardjo & Zamzami, 2014; Nurcan et al., 2016).

La variance intègre les avantages des approches de réutilisation précédentes (standardisation, gain de temps, efficacité, amélioration de la qualité...) mais facilite également les analyses multi-critères (Weilkiens, 2012), en permettant l'analyse des alternatives de conception (Malak et al., 2009). Cependant, de nombreux défis attendent celui qui cherche à mettre en place une ligne de produits (Le Put, 2016) : mise en œuvre (maturité, changement culturel, impact sur le cycle de vie...), objectifs (réponse à un besoin, ROI attendu, optimisation du processus industriel...), dépendance entre les processus de l'ingénierie système (gestion de configuration, capitalisation et réutilisation, modélisation).

Alors que la réutilisation est une pratique relativement bien documentée dans le domaine logiciel, la formalisation de cette pratique dans le domaine de l'Ingénierie Système est relativement nouvelle et peu de travaux présentent des applications industrielles réelles (Chalé Góngora et al., 2014).

2.1.3. Vers la réutilisation de modèles pour le transfert de connaissances et de savoir-faire

Les informations contenues dans les « archives mentales » créées par les ingénieurs sont essentielles, mais ont l'effet néfaste d'être « statiques » car elles restent implicites et biaisées (point de vue des ingénieurs). En effet, ces « archives mentales » sont enfermées dans l'esprit d'un ingénieur, ce qui rend difficile le transfert d'informations d'un ingénieur à un autre pour favoriser la réutilisation (Demian & Fruchter, 2006; Mourtzis et al., 2016). Une information « dynamique » entre les équipes d'ingénierie est un défi crucial pour de nombreuses entreprises qui doivent gérer des systèmes complexes, car les informations doivent être partagées, complètes et cohérentes dans le projet (Miled, 2014). Ainsi, ces « archives mentales » réalisent toutes leur potentiel en devenant dynamiques, c'est-à-dire, en devenant des « actifs d'ingénierie » partagés (section 1.3.2.). La diffusion de ces « actifs d'ingénierie » est très importante car elle permet une meilleure compréhension du système d'intérêt et des activités d'ingénierie. Par exemple, dans l'ingénierie des exigences (Darimont et al., 2017), au moins 55% des ingénieurs utilisent le « copier-coller » pour réutiliser des exigences ou des groupes d'exigences et 50% dupliquent des spécifications complètes. Ces pratiques ont peu de valeur ajoutée, puisqu'elles ne transmettent pas une bonne compréhension du système, en particulier de son comportement. C'est pourquoi il est nécessaire de promouvoir un transfert efficace des connaissances et du savoir-faire, afin de faciliter leur circulation et leur réutilisation. C'est la raison pour laquelle les attentes actuelles sont de promouvoir l'utilisation de modèles plutôt que de documents écrits en langage naturel. En effet, le format du transfert a un rôle prépondérant. Comme les systèmes complexes produisent une énorme quantité d'informations et ont besoin de descriptions ou de spécifications efficaces, la réutilisation peut aider à absorber la complexité croissante des systèmes modernes (Trummer et al., 2011).

La prochaine étape pour améliorer l'efficacité de l'ingénierie consiste à se concentrer sur la réutilisation des connaissances et du savoir-faire au moyen de modèles. Une voie qui semble particulièrement prometteuse passe par l'utilisation de

patrons, qui proposent des guides génériques pour faciliter et systématiser la construction de systèmes complexes (Cochard, 2017). Comme ils peuvent être utilisés à toutes les étapes du cycle de développement (Gzara et al., 2003), la réutilisation des patrons semble être la forme de réutilisation la plus appropriée pour l'ingénierie de systèmes complexes (May & Taylor, 2003), à condition que ce concept puisse être formalisé dans un processus de modélisation.

2.2. L'utilisation de patrons pour la valorisation des actifs d'ingénierie

2.2.1. Historique sur l'utilisation des patrons

Pour de nombreux membres de la communauté scientifique qui s'étaient intéressés au concept de « patron », les premiers promoteurs de cette notion sont Christopher Alexander, Murray Silverstein, et Sara Ishikawa dans leur livre sur l'architecture et l'aménagement urbain (Alexander et al., 1977). Le livre formalise un langage pour les patrons, composé d'un certain nombre de patrons qui les ont aidés, par exemple, à exprimer la conception de l'intérieur d'une habitation en fonction des relations entre les parties d'une maison, et des règles pour transformer ces relations (Coplien, 1997). Ils ont commencé à identifier des patrons avec l'idée que :

« *Each pattern describes a problem which occurs over and over again in our environment, and then describes the core of the solution to that problem, in such a way that you can use this solution a million times over, without ever doing it the same way twice.* »²¹ (Alexander et al., 1977).

De la même manière que les ingénieurs réutilisent leurs connaissances basées sur leur expérience antérieure, (Cloutier, 2006) indique que les auteurs de (Alexander et al., 1977) n'ont pas inventé les patrons dont ils parlent mais plutôt que :

« *[patterns] came from observation and testing ; and only then were they documented as patterns* »²²

L'approche par patron a ensuite été introduite dans divers domaines de l'ingénierie tels que l'ingénierie logicielle, des exigences, des télécommunications et des systèmes de contrôle (Cloutier & Verma, 2007). (Beck & Cunningham, 1987) ont été les premiers à proposer des patrons orientés objet dans la communauté du logiciel, lorsque les ingénieurs ont commencé à appliquer les concepts développés par Alexander et ses co-auteurs. L'objectif était d'améliorer la qualité et de faciliter la rédaction du code informatique en adoptant de bonnes pratiques. Les auteurs de (Gamma et al., 1995), également connus sous le nom du « *Gang of Four* », décrivent 23 patrons de conception logiciels (*Software Design Patterns*) tels que les patrons

²¹ « Chaque patron décrit un problème qui se répète encore et encore dans notre environnement, puis décrit le cœur de la solution à ce problème, de telle sorte que vous puissiez l'utiliser un million de fois, sans jamais le faire deux fois de la même façon »

²² « [les patrons] proviennent d'observations et d'essais; et ce n'est qu'alors qu'ils ont été documentés comme patrons ».

« Composite », « Iterator », « Command »... Un patron de conception est alors vu comme une solution générale et réutilisable à un problème récurrent dans la conception d'applications orientées objet ; il décrit une solution éprouvée pour résoudre des problèmes d'architecture logicielle. Comme les patrons de conception ne sont pas des bouts de codes directement implémentables, mais plutôt des descriptions structurées de la programmation informatique, cela signifie qu'ils sont indépendants des langages de programmation. L'utilisation de patrons de conception offre de nombreux avantages. Tout d'abord, ils permettent de résoudre un problème de conception grâce à une solution éprouvée et validée par des experts. Ainsi, la vitesse et la qualité de la conception augmentent alors que les coûts diminuent. De plus, ils sont documentés et peuvent donc être connus d'un grand nombre de développeurs, ce qui facilite également la communication car la connaissance d'un patron de conception par les ingénieurs logiciels rend inutile d'entrer dans les détails lors de la conception. Ainsi, les patrons de conception ont été largement acceptés et leur écriture encouragée pour capturer les expériences et les connaissances. À tel point que le nombre de bibliothèques de patrons logiciels a explosé. Afin de retrouver de la cohérence, les auteurs de (Gaffar & Moha, 2005a) proposent de réduire ces bibliothèques de patrons logiciels afin d'assainir l'offre et promouvoir une réutilisation plus « propre ». Pour cela, ils définissent la syntaxe et la sémantique des patrons afin de détecter et analyser les redondances. Cela leur a permis de ranger les patrons en différentes classes, allant de patrons qui sont identiques (doublons) à des patrons qui se ressemblent (à différents degrés de similarité). Leur travail permet de réduire la taille des bibliothèques de patrons en se focalisant sur un plus petit ensemble de patrons, mais qui semblent pertinents.

Dans le domaine de l'Ingénierie Système, l'intérêt des patrons réside dans leur rôle face à la complexité croissante des systèmes et à la difficulté de formaliser un large corpus de connaissances et de savoir-faire. C'est pourquoi, (Barter, 1998) propose la création d'un langage pour les patrons en Ingénierie Système. Ce langage est un ensemble de patrons qui, lorsqu'ils sont combinés, répondent à des problèmes plus larges que ceux qu'un patron individuel peut aborder. Ce langage peut être représenté graphiquement par une carte (*Pattern Map*). (Barter, 1998) vise à capturer et à gérer le corpus des connaissances en Ingénierie Système, en utilisant des patrons et un langage de patrons. Il propose également d'utiliser des cartes (*Concept Map*) pour représenter les relations entre les patrons dans un langage de patrons.

Poursuivant la même direction, (Haskins, 2003) propose également l'utilisation de patrons pour capturer les connaissances et les savoir-faire en Ingénierie Système. Cependant, contrairement à (Barter, 1998), où un langage de patrons est considéré comme un ensemble de patrons, sans description détaillée des types de relations entre les patrons, l'auteur de (Haskins, 2003) aborde plus spécifiquement les relations entre patrons dans (Haskins, 2005). D'autres travaux ont utilisé le concept de patron, notamment dans le domaine des Systèmes d'Information Produits, où (Gzara et al., 2003) proposent un cadre méthodologique basé sur la réutilisation des patrons durant tout le cycle de vie, ou (Conte et al., 2002) qui proposent des bibliothèques de patrons qui s'insèrent dans un cadre méthodologique pour la conception des systèmes d'information produits.

Avec l'intérêt croissant au sein de la communauté Ingénierie Système pour l'ISBM (Estefan, 2008), et puisque le concept de patron se révèle intéressant, l'INCOSE (*International Council on Systems Engineering*) a ouvert une « *MBSE Patterns Challenge Team* » en 2013, dans le cadre de l'*INCOSE MBSE Initiative*. En 2016, le groupe de travail devient l'« *INCOSE MBSE Patterns Working Group* » qui vise à faire progresser la connaissance, les pratiques et les ressources associées à la création, à l'application et à l'amélioration continue des patrons en ISBM.

Après cet historique sur les patrons, la section suivante met l'accent sur les patrons en Ingénierie Système, afin d'appréhender les concepts fondamentaux nécessaires permettant de favoriser la réutilisation en Ingénierie Système.

2.2.2. Utilisation de patrons en Ingénierie Système

Comme nous l'avons rappelé dans la section précédente, la notion de « patron » et son applicabilité dans le domaine de l'Ingénierie Système ont déjà été discutées. Cependant, ce concept a de nombreuses facettes, et souvent les patrons sont définis uniquement par leurs caractéristiques. Pour le débutant, il est difficile de se représenter la cible à atteindre ainsi que les moyens à sa disposition pour se servir d'un patron. Le but de cette section est de réaliser une synthèse des différents travaux sur les patrons en Ingénierie Système afin d'améliorer la compréhension de ce concept.

2.2.2.1. Caractéristiques récurrentes des patrons

L'étude des travaux de recherche antérieurs permet d'identifier les caractéristiques récurrentes des modèles. Elles sont synthétisées dans le Tableau 2 et détaillées dans cette sous-section.

Tableau 2. Caractéristiques récurrentes (CR) des patrons dans la littérature

CR1.	Les patrons ne sont pas créés de toutes pièces, ils sont déjà existants et ont besoin d'être « extraits » (<i>mined</i>) des savoir-faire et des connaissances.
CR2.	Un patron est représenté dans un format statique et dispose d'attributs spécifiques, dont certains fondamentaux, qui forment un triptyque de trois éléments {Contexte, Problème, Solution}.
CR3.	L'objectif d'un patron est de transférer efficacement les informations entre les parties prenantes, au bon niveau d'abstraction, et ce pour favoriser la réutilisation
CR4.	L'application d'un patron est déterminée par certaines conditions, comme leur périmètre et le niveau de performance (qualité, temps de conception,...) dans leur application, mais également leur niveau de maturité.

Technique d'extraction des patrons

Il arrive que des conceptions similaires soient faites de façon entièrement indépendantes par des ingénieurs différents (Gaffar & Moha, 2005b). Ce phénomène prouve que des éléments de conception similaires existent dans différents projets.

Ainsi, l'étude et la documentation de tels éléments favorisent la réutilisation sur les futurs projets. En effet, cela empêche de « réinventer la roue » et fournit un vocabulaire commun, à partager entre les projets sur les différents concepts utilisés. Ce qui vient d'être décrit est cohérent avec l'idée que les patrons ne sont pas créés à partir d'une page blanche mais qu'ils sont extraits (*mined*) de l'existant (Hanmer & Kocan, 2004). Il semble en effet, que les patrons d'Ingénierie Système soient embarquées dans les designs existants et qu'il soit nécessaire de trouver un mécanisme pour les identifier. Ces patrons sont considérés comme « enfouis » (*buried pattern*) par (F Pfister et al., 2012), ce qui représente un obstacle scientifique, car les techniques d'extraction (de « minage ») diffèrent selon que les designs soient représentés avec des langages formels ou non formels. Comme le processus d'extraction semble être essentiel pour créer des langages de patrons, différentes approches ont été identifiées pour écrire des patrons. Par exemple, (Haskins, 2007) s'intéresse à trois processus d'extraction : par interview, par l'apprentissage de l'écriture d'un patron, par emprunt (tiré de la littérature).

Il est cependant possible d'être plus complet en se basant sur la classification de (DeLano, 1998), qui range les processus d'extraction en trois catégories :

- Contributions individuelles : Les auteurs du patron ont utilisé leurs propres expériences ou celles de leurs collègues. La contribution est basée sur leur capacité à écrire de bons patrons.
- Contributions indirectes : Les patrons sont écrits à partir d'entretiens avec des experts ou en guidant une autre personne dans l'écriture des patrons. Mais elle peut aussi provenir d'emprunts à la littérature ou d'entreprises du même domaine qui peuvent partager l'information.
- Contributions aux ateliers/réunions : Comme (Haskins, 2007) l'a fait lors d'un tutoriel pour l'INCOSE, cette approche consiste à regrouper les participants par groupe d'une dizaine de personnes, afin de réfléchir aux éléments d'un patron. Un modérateur et un animateur peuvent être inclus pour garder la discussion dans la bonne direction.

Format de capture des patrons

Comme nous l'avons vu, si la technique d'extraction d'un patron est importante, le format dans lequel il est capturé est tout aussi important. Et malgré les différences entre les formats, selon le langage utilisé (textuel ou modélisation), il semble qu'un ensemble minimal d'informations soit toujours décrit, et constitue des attributs génériques interdisciplinaires qui caractérisent un patron. Outre un nom évocateur qui constitue sa propriété d'identification, un patron semble toujours être décrit par, au moins, un triptyque composé de {Contexte, Problème, Solution}. Ce triptyque est mentionné par de nombreux travaux de recherche tels que (Barter, 1998; Cauvet et al., 1998). (Gaffar & Moha, 2005a) nomme même ce triplet le « triangle minimal » où le triptyque est vu comme la description fondamentale du patron (Figure 15).

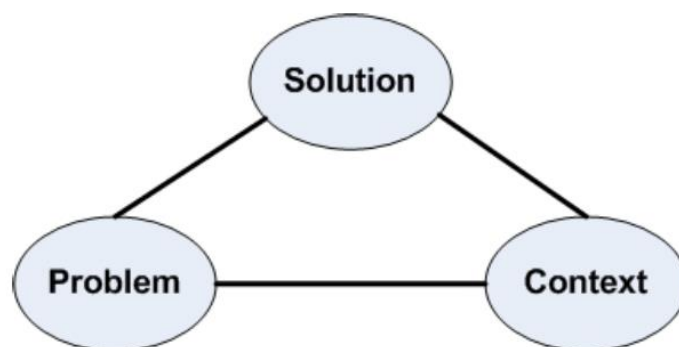


Figure 15. Triangle minimal d'un patron, extrait de (Gaffar & Moha, 2005a)

Que ce soit un triptyque, un triangle, ou un triplet, cette description, minimale et fondamentale, vise à résumer l'idée qu'un patron fournit une solution à un problème récurrent dans un contexte particulier. Cependant, afin de compléter la description d'un patron, de nombreux travaux élargissent les éléments minimaux nécessaires. Ainsi (Barter, 1998) décrit un modèle générique avec les éléments minimaux à compléter : un nom évocateur, le triptyque {Contexte, Problème, Solution}, les forces (ou tensions) qui influencent l'application d'un patron, et aussi les patrons reliés. Dans d'autres exemples donnés par (Cauvet et al., 1998; Cloutier & Verma, 2007; Haskins, 2005; F Pfister et al., 2012), les éléments du modèle générique sont également cités. Mais ils peuvent aussi être divisés en éléments plus petits, comme par exemple le formalisme décrit par (Gamma et al., 1995), qui fait référence à la solution à travers des éléments qui renseignent sur : l'application, la structure, les avantages, des exemples de code ou bien les utilisations connues. C'est cette diversité de description qui a poussé les auteurs de (Cloutier & Verma, 2007) à conduire un sondage qui leur permet de proposer un ensemble d'attributs recommandés pour décrire un patron système (Figure 16 – page suivante). Ces travaux démontrent également que les informations les plus recherchées par les ingénieurs et les architectes systèmes concernent la justification du patron, un exemple d'application, ainsi que les utilisations connues.

Les auteurs de (Cloutier & Verma, 2007) soulignent également le fait que les concepts utilisés en Ingénierie Système représentent des niveaux plus élevés de complexité et d'abstraction que les notions utilisées par Alexander en architecture. Par exemple, les concepts sous-jacents à la notion de contrôle-commande exigent une notation plus complexe que les dessins utilisés dans (Alexander et al., 1977). Ainsi, (F Pfister et al., 2012) utilisent un diagramme de type eFFBD (*Enhanced Functional Flow Block Diagram*) pour représenter le modèle de comportement de leur patron de contrôle-commande (Figure 17). La description de patrons complexes nécessite donc des fondements conceptuels formels (sous la forme d'un méta-modèle par exemple), qui seront utilisés pour le recensement, la gestion et l'application de patrons spécifiques au domaine de l'Ingénierie Système.

Form Heading	Explanation
Pattern Name:	The name of the pattern should be descriptive to enable the pattern user to understand the usage.
Aliases:	Other names by which the pattern may be known
Keywords:	Keywords which assist in locating appropriate patterns in a repository
Problem Context:	Brief discussion of the types of situations in which the problem may occur - it should be broad enough to allow for any number of situations in which the problem may arise
Problem Description:	What is the problem this pattern can be used to solve?
Forces:	What challenges exist in the problem being addressed by the pattern, and the problems in applying the pattern? May also include constraints the pattern may impose if used. May describe the pattern from multiple views
Pattern Solution:	Discussion on how the pattern solves the problem being addressed.
Diagrams:	This can be one or more diagrams necessary to represent the pattern. This can be any notational method desired.
Interfaces:	Discussion of the critical interfaces or information flows necessary in implementing the pattern - what parameters of the interface can change and which ones can not. What are the interface dependencies, if any?
Resulting Context:	What are the unaddressed issues remaining when the pattern is applied/used.
Example:	An example of how the pattern may be applied. Usually in the form of a diagram or model
Pattern Rationale:	Why the pattern works
Known Uses:	Where else is the pattern being used in other places or applications?
Related Patterns:	Other patterns that may work in conjunction or in association with this pattern
References:	Other information that may be useful in understanding or applying the pattern
Author(s):	Who documented the pattern? May add a date if desired.

Figure 16. Liste recommandée de caractéristiques pour décrire un patron système, extrait de (Cloutier & Verma, 2007)

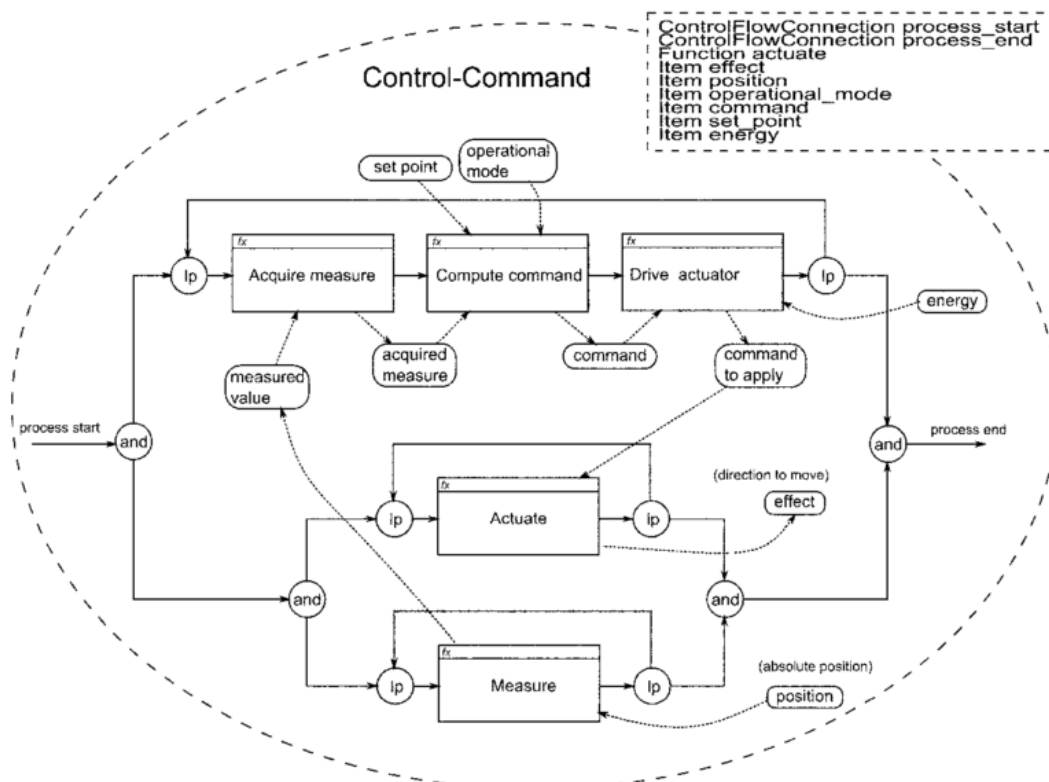


Figure 17. Exemple de patron d'Ingénierie Système de la boucle de contrôle-commande en langage eFFBD, extrait de (F Pfister et al., 2012)

2.2.2.2. Valeurs des patrons en Ingénierie Système

Bien que nous ayons pu trouver des caractéristiques récurrentes pour la notion de patron, cela ne permet pas de conclure sur leur utilité dans le cadre d'une démarche d'Ingénierie Système. En effet, encore faut-il pouvoir démontrer une certaine valeur à utiliser ce concept. Comme nous l'expliquions dans la section 2.1 de ce chapitre, la volonté qui nous anime, au-delà de l'idée de « réutilisation », est la volonté de mettre en mouvement de l'information statique pour la rendre dynamique, afin qu'elle devienne un artefact que les ingénieurs puissent utiliser dans leur travail quotidien. Comme les modèles, les patrons sont des abstractions ou un ensemble d'abstractions de la réalité et non une solution magique. Ils permettent aux gens de résoudre des problèmes complexes en tirant parti de l'expérience, des connaissances et du savoir-faire de leurs prédécesseurs.

Une étude menée dans la communauté des logiciels libres (*Open Source Software*) par (Hahsler, 2005) a vérifié si les 23 patrons de conception introduits par (Gamma et al., 1995) étaient utilisés. L'auteur de l'étude a observé que 11,4% des projets avec un seul développeur utilisaient ces patrons, environ 20% pour les projets avec 2 à 9 développeurs et 61,5% lorsque la taille de l'équipe dépassait 10 personnes (Figure 18).

		Team size						Total
		1	2	3	4	5-9	10+	
Developer	0	226	107	43	26	29	5	436
using	1	29	21	8	6	6	2	72
patterns	2		2		1	2	3	8
	3						1	1
	4						1	1
	10						1	1
Total		255	130	51	33	37	13	519
Observed projects with patterns		11.4%	17.7%	15.7%	21.2%	21.6%	61.5%	16.0%
Estimated projects with patterns ^a		11.4%	21.5%	30.4%	38.3%	50.8%	82.2%	18.4%

^a Using team size=1 to estimate probability of a developer using patterns

Figure 18. Utilisation des patrons en fonction de la taille de l'équipe de développement, extrait de (Hahsler, 2005)

Ces résultats semblent indiquer que la documentation explicite d'un patron permet une communication efficace au sein d'une équipe de développement. Ce qui confirme l'un des principaux arguments en faveur de l'utilisation de patrons et qui correspond à sa capacité à améliorer la communication entre les membres d'une équipe. En effet, au niveau de complexité actuelle des systèmes, il est difficile pour un seul individu de gérer et de maîtriser tous les détails d'un système. Ainsi, la capacité des patrons à fournir les informations essentielles, au bon moment sera un argument en faveur de leur adoption.

Comme dans la communauté du logiciel, les patrons offrent la possibilité de créer un lexique commun entre les architectes systèmes, qui favorise une compréhension commune de l'architecture des systèmes, et qui sera validée par des experts. L'objectif est de favoriser la diffusion de caractéristiques de conception

communes afin de les réutiliser, et ainsi réduire les coûts et le temps de développement d'un nouveau système. Cependant, comme les patrons visent à convertir des informations statiques en informations dynamiques, les patrons eux-mêmes ne doivent pas rester statiques et être évolutifs. Il est donc essentiel que les patrons évoluent pour prendre en compte les évolutions des systèmes ou les besoins utilisateurs. De cette façon, les patrons favoriseront réellement la réutilisation et aideront à contrôler la complexité des systèmes.

Afin de maximiser l'efficacité des patrons, il faut également cibler les artefacts à prendre en compte. En effet, en fonction du niveau d'abstraction il faut pouvoir couvrir l'un des deux périmètres suivants :

- Le système d'intérêt en réutilisant des exigences, des éléments d'architectures..., comme illustré dans l'architecture d'un centre de contrôle des services d'urgence par (Kalawsky, Joannou, et al., 2013) ;
- Les activités d'Ingénierie Système en réutilisant des guides méthodologiques récursivement à différents niveaux du système, comme l'illustre le patron défini par (Cook & Schindel, 2017) concernant les processus d'innovations.

2.2.2.3. Les limites des patrons en Ingénierie Système

Néanmoins, comme les patrons ne sont pas des « remèdes miracles », des arguments contre leur utilisation ont été soulevés. Le premier argument reproche la difficulté, voire l'impossibilité de créer ou d'innover avec une telle démarche. On peut en effet se demander s'il est toujours possible de réaliser des innovations de rupture (« futur ») si le développement de nouvelles architectures est réalisé en assemblant des patrons (« passé »). Cette objection rejoint d'autres raisons exposées par (Cloutier, 2005) qui concernent la capacité des patrons à s'adapter aux différents objectifs poursuivis par une entreprise dans un contexte industriel. On peut résumer ces trois objections sous la forme des questions suivantes :

- a) Comment répondre à des besoins nouveaux qui n'ont pas été résolus auparavant ? Par exemple, comment favoriser l'innovation ?
- b) Comment gérer un choix « irrationnel » ? Par exemple, les exigences requièrent une solution qui concerne l'esthétique au détriment de la fonction ;
- c) Comment gérer le rythme rapide des évolutions technologiques ?

Concernant l'objection a), il convient de plutôt retourner la question et donc de se demander : comment réussir à innover tout en réutilisant des connaissances et des savoir-faire ? Ainsi, en ce qui concerne les moyens d'innover par la réutilisation, certains travaux répondent en partie à la question. Par exemple, (Majchrzak et al., 2004) ont extrait un patron de processus (Figure 19) à partir d'études de cas du *Jet Propulsion Laboratory*. Ils proposent un processus d'innovation en six étapes dont la tâche principale consiste à rechercher et à évaluer les travaux des autres projets afin d'exploiter les idées existantes pour générer de nouvelles combinaisons. Dans ce contexte, le périmètre de recherche ne doit pas se limiter aux solutions présentes dans la base de connaissances et de savoir-faire du domaine étudié, car il ne s'agit pas de reproduire, mais bien d'intégrer des idées recombinaisons. Ce patron n'est peut-être pas

nécessaire et suffisant, mais il montre comment il peut aider à formaliser le savoir-faire pour encourager l'innovation lors des prochains projets. Les patrons visent également à réduire les durées des différentes phases du cycle d'ingénierie, ce qui peut représenter une importante réduction des coûts et du temps de développement, autant de ressources qui pourront être utilisées pour innover.

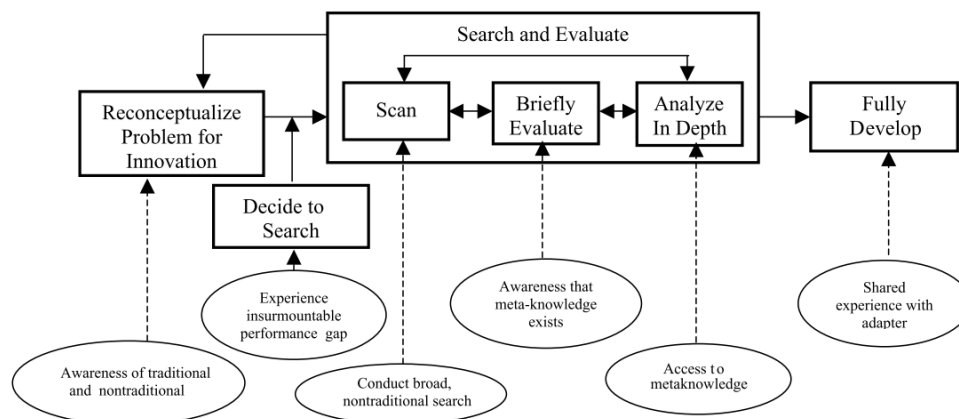


Figure 19. Patron de processus de réutilisation de connaissance pour l'innovation, extrait de (Majchrzak et al., 2004)

La deuxième objection b) souligne le fait que les patrons doivent prendre en compte des exigences ponctuelles mais qui peuvent être très contraignantes. Il est vrai que pour être utiles, les patrons se doivent d'être flexibles. Comme le résume (Haskins, 2005), les patrons doivent « offrir une expérience d'apprentissage aussi confortable qu'une conversation avec des collègues ». Cela signifie qu'il y a un défi organisationnel à relever pour motiver les ingénieurs à contribuer à une base de données de patrons. D'une part, les experts doivent comprendre l'importance de la documentation et de la validation des patrons afin de former des ingénieurs systèmes non expérimentés. D'autre part, cela signifie également qu'un support doit être fourni aux équipes d'ingénieurs afin de les orienter dans la démarche.

La troisième objection c) concerne l'évolution des technologies, sa tendance à s'accélérer et donc la difficulté de s'adapter, face aux changements. Comme les mises à niveau technologiques sont fréquentes, on peut objecter que le besoin de réagir très vite sur des marchés concurrentiels rend les patrons rapidement inutiles. Bien que cette objection soit pertinente pour les patrons de bas niveau, qui traitent de problèmes technologiques récurrents, il s'avère que les patrons plus abstraits - concernant l'architecture de haut niveau par exemple - peuvent rester pertinents. C'est par exemple le cas dans les industries où les projets sont à long terme comme l'aérospatiale, où les connaissances et les savoir-faire d'experts sur les systèmes et les projets ne sont pas toujours bien documentés (Cloutier, 2005). En effet, si les connaissances et le savoir-faire des ingénieurs seniors ne sont pas documentés, la capacité à reconnaître un problème et d'appliquer une solution existante n'est plus disponible pour les ingénieurs juniors. En outre, cette objection, principalement centrée sur le système d'intérêt, ne tient pas compte de l'autre périmètre de couverture des patrons explicités en section 2.2.2.2. En effet, les patrons qui touchent aux activités d'Ingénierie Système peuvent être maintenus dans le temps au sein de chaque entreprise, indépendamment des évolutions du marché.

Au fur et à mesure que l'intérêt pour l'ISBM augmente, il est important d'étudier le travail à effectuer pour intégrer le concept de patron dans ce cadre. L'intégration du langage de modélisation OMG SysML (*OMG System Modelling Language*) et ses conséquences sur la définition des problèmes et la description des solutions sont particulièrement intéressantes et seront examinées dans la section suivante.

2.3. Utilisation de patrons dans le cadre de la transition vers l'ISBM

Bien que des travaux de recherche aient été effectués pour évaluer si le concept de patron pouvait être appliqué dans le domaine de l'Ingénierie Système (Cloutier, 2006; Haskins, 2005; F Pfister et al., 2012), la valeur des patrons dans un cadre d'ISBM n'a pas été encore pleinement explorée.

À travers l'état de l'art réalisé (Q Wu et al., 2020), il apparaît que l'introduction d'une capacité de réutilisation dans les méthodologies d'ISBM permet de concevoir un nouveau projet avec beaucoup moins d'efforts humains, en bénéficiant de la réutilisation de modèles système déjà existants (Shani & Broodney, 2015). L'identification et la capture de patrons favorisent la réutilisabilité des modèles (Spangelo et al., 2012), ce qui profite aux nouveaux projets en accélérant les phases d'ingénierie identiques, via l'utilisation de patrons dans les modèles système.

L'objectif de cette section est de montrer l'utilité de la capitalisation et de la réutilisation des modèles système en montrant comment le concept de patron peut être mis en œuvre en ISBM, et donc favoriser son adoption à une plus grande échelle. Tout d'abord, une présentation sera faite sur l'intérêt d'une capacité de réutilisation dans un cadre d'ISBM. Ensuite, dans une deuxième étape, les travaux de recherche qui s'intéressent spécifiquement à l'utilisation de patrons au sein d'une ISBM seront analysés.

2.3.1. Réutilisation de modèles dans le cadre de l'adoption de méthodologies d'Ingénierie Système Basée sur les Modèles

Les modèles sont une abstraction ou un ensemble d'abstractions de la réalité (c'est-à-dire que la réalité peut être représentée sous différentes vues cohérentes), ce qui signifie qu'il peut être facile de réutiliser un modèle dans un nouveau projet car aucune limitation physique ne s'y oppose. Cependant, selon le type de réutilisation à effectuer, la complexité du système en cours de conception et l'hétérogénéité des méthodologies et des outils, il apparaît, dans un premier temps, que l'adoption des méthodologies ISBM est pénalisée. En effet, réutiliser des artefacts existants (même s'ils ont été conçus pour être réutilisables) est plus difficile que prévu.

Comme l'affirme l'auteur de (Korff, 2013), « le plus gros problème est de transférer et de gérer les connaissances de ce qui est réellement disponible pour la réutilisation ». En effet, il est nécessaire que les ingénieurs soient conscients des actifs d'ingénierie qui peuvent être définis et réutilisés. Pour répondre à ce besoin, l'auteur propose d'étendre le standard RAS (*Reusable Asset Specification*), afin de prendre en compte l'utilisation du langage SysML. La définition de ces actifs peut passer par une approche descendante ou ascendante. Cependant, la création de bibliothèques d'actifs

ne suffit pas, car l'objectif est de permettre aux ingénieurs de réutiliser ces ressources dans leurs projets en cours. Pour cela, l'article indique que les utilisateurs devraient avoir la possibilité de rechercher, de publier et de réutiliser des ressources dans les bibliothèques et les catalogues définis. Contrairement à (Korff, 2013), (Paydar & Kahani, 2015) ne se concentrent pas sur la création d'actifs mais proposent une approche concernant l'adaptation d'actifs réutilisables prometteurs lors d'un processus de réutilisation de modèles. Il vise à aider les ingénieurs à spécifier les exigences fonctionnelles en réutilisant les modèles d'applications Web déjà existantes. L'article se focalise notamment sur l'adaptation des diagrammes d'activité exprimés en UML (*Unified Modelling Language*) en fonction des cas d'utilisations. Ce travail propose de créer semi-automatiquement un diagramme d'activité à partir de diagrammes d'activité déjà existants en fonction du diagramme de cas d'utilisation en entrée. Bien que cette approche ne soit pas présentée dans un cadre d'ISBM, le fait que le langage SysML soit une extension du langage UML (Figure 20) permet d'envisager des mécanismes similaires en ISBM.

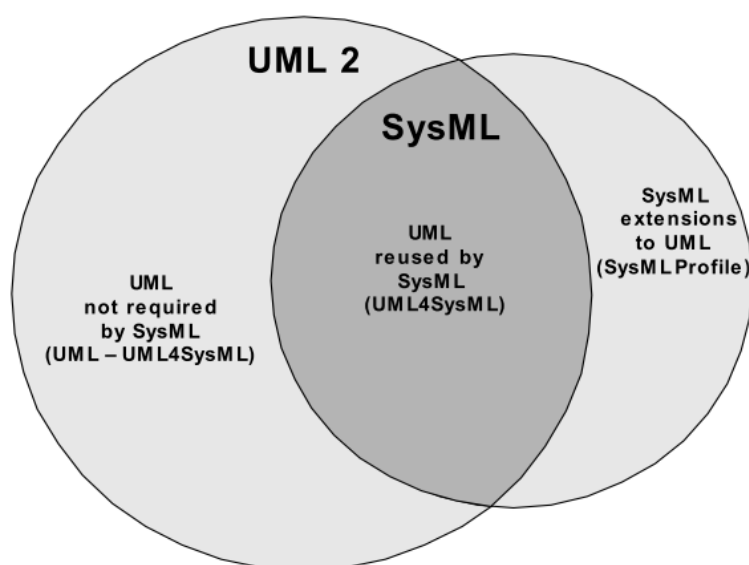


Figure 20. Diagramme de Venn décrivant les relations entre UML et SysML, extrait de (OMG 2017a, p. 9)

Ainsi, les diagrammes de cas d'utilisation sont identiques, tandis que les diagrammes d'activité sont similaires notamment dans leur usage (OMG 2017a, p. 11). Il est donc possible d'envisager une transposition.

Dans le cas de la modélisation de variantes en ISBM, les nombreuses perspectives et niveaux architecturaux nécessaires induisent une croissance exponentielle de l'information ainsi qu'une complexité accrue due à la dimensionnalité supplémentaire des variantes (Di Maio et al., 2016). (Oster et al., 2016) proposent donc une approche de construction et d'exploitation d'architectures composables pour la conception et le développement d'une ligne de produit. En s'appuyant sur des architectures de référence réutilisables, les auteurs recherchent quatre avantages : gérer la cohérence au sein des équipes, démarrer rapidement le projet, aligner les systèmes résultants et renforcer la base de connaissances et de savoir-faire existante. Pour cela, ils utilisent SysML comme langage de base pour définir les modèles

descriptifs de l'architecture de référence du système composable et utilisent un profil personnalisé concernant la partie paramétrique du langage. Cette méthodologie a permis à la ligne de produits d'évoluer plus facilement puisque l'ajout, la mise à jour ou la modification de nouveaux composants se faisait automatiquement. Cependant, ils ont observé que la courbe d'apprentissage était assez raide et que la méthodologie était dur à apprendre. Cela qui signifie qu'il faut travailler à l'adoption de telles méthodologies, que ce soit dans le développement d'outils, d'interfaces ou dans les concepts utilisés. Leurs travaux portent uniquement sur la couche physique, ainsi les travaux de (Di Maio et al., 2016) se concentrent sur le développement d'une architecture fonctionnelle, qui peut s'adapter à des décisions prises dans la couche logique de système de systèmes. En effet, dans ces systèmes, il apparaît que la couche physique est contrainte par le fait que les systèmes en interaction existent déjà. Les résultats de leur étude sont un processus d'ISBM qui consiste en l'intégration d'un modèle système avant l'analyse des variantes. Il exige que le modèle système contienne à la fois la configuration d'origine et les variantes. Cette séparation est importante dans le cas où une nouvelle technologie est introduite mais que les plus anciennes ne sont pas encore abandonnées. Ils étudient également la possibilité de modéliser des variantes en SysML, en mettant l'accent sur l'extension d'un modèle existant pour prendre en charge une nouvelle variante dans le cas où une technologie similaire est utilisée.

Cette tendance à réutiliser les modèles dans un cadre d'ISBM s'accroît, comme le prouve le travail en cours sur une version 2 du langage SysML, qui intègre des exigences sur la capacité à favoriser la réutilisation des modèles (OMG, 2017b).

2.3.2. Utilisation de patrons en Ingénierie Système Basée sur les modèles

L'introduction d'une capacité de réutilisation ISBM semble donc améliorer l'efficacité de l'ingénierie. Cependant, la courbe d'apprentissage des méthodologies d'ISBM est encore très importante pour les organisations et nécessite d'aider les ingénieurs à « identifier rapidement non seulement les solutions architecturales valables, mais également les solutions optimales pour les besoins de la mission » (Oster et al., 2016). C'est pourquoi, il semble que le concept de patron puisse être une réponse à ce défi. En effet, des travaux ont été réalisés pour introduire des patrons au cours de différentes phases d'ingénierie. (Gasser, 2012) décrit par exemple des patrons de construction comportementale (Figure 21) afin de faciliter la modélisation du comportement du système. Au lieu de penser au niveau d'éléments graphiques atomiques, ces patrons définissent une manière structurée de représenter des blocs élémentaires du comportement. Cette approche est très utile pour structurer la pensée des ingénieurs, et permet également de surmonter un gros problème dans les outils de modélisation, et que l'auteur surnomme « politique de connexion ». Cela fait référence à l'équilibre esthétique des diagrammes²³ qui est irrémédiablement brisé lorsque de nouveaux éléments sont ajoutés. Le temps dépensé afin de rendre à nouveau le diagramme « joli » est long et perdu à la prochaine modification. Il préconise donc la mise en place d'une « stratégie d'insertion », dans laquelle le redimensionnement du

²³ Nous entendons par là, la recherche d'une disposition des éléments de modélisation qui facilite la lecture et la compréhension d'un diagramme

diagramme est automatique lorsque de nouveaux éléments sont insérés. Les patrons de construction comportementale proposés permettent également aux ingénieurs de travailler selon un mode de pensée algorithmique (à un niveau d'abstraction plus élevé), ce qui permettra de se concentrer davantage sur le comportement attendu que sur l'esthétique des diagrammes.

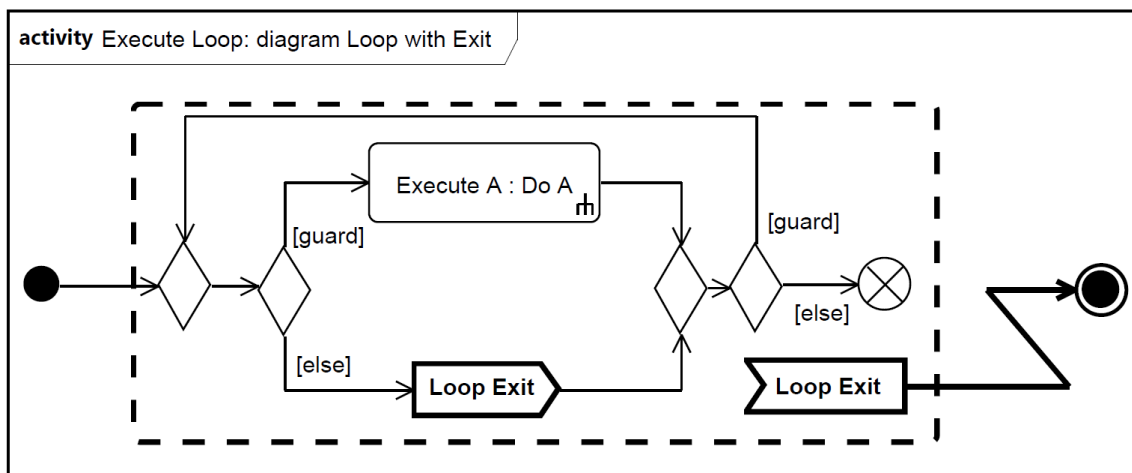


Figure 21. Patron « Loop Exit Construct », extrait de (Gasser, 2012)

Afin d'aider les ingénieurs à se concentrer sur ce qui est important, les patrons doivent guider le développement pour éviter les déviations. Par exemple, (Barbieri et al., 2014) proposent un processus de développement de systèmes mécatroniques basé sur un patron de conception en SysML. L'objectif est de démontrer que donner des lignes directrices adéquates pour la modélisation peut être bénéfique au processus de développement en permettant une traçabilité efficace de toutes les informations du modèle système. Cette approche s'avère particulièrement utile pour faciliter l'analyse d'impact dans les phases ultérieures du cycle de vie et pour la réutilisation pour les futurs projets. En effet, le fait de pouvoir tracer les évolutions depuis les exigences des parties prenantes vers celles du composant, aide les ingénieurs pour l'allocation physique et facilite l'intégration d'un modèle dans un nouveau projet au même niveau d'abstraction. De plus, il peut être crucial d'aider les ingénieurs à prendre des décisions. C'est pourquoi (Kalawsky, Joannou, et al., 2013) explorent les patrons d'architecture afin, de réaliser des analyses multi-critères sur les systèmes de systèmes, et de fournir des guides pour la réutilisation d'architectures existantes. Aujourd'hui, l'analyse de systèmes à grande échelle n'est pas une tâche facile. Cependant, avec l'utilisation de patrons, exprimés sous la forme de modèles décrits en SysML, cette analyse est devenue possible, même si tous les détails des systèmes ne sont pas encore connus. L'exploitation de patrons qui représentent le système d'intérêt peut aider à créer un modèle et ainsi induire une meilleure compréhension de son comportement. Cette approche permet de modifier le système afin d'en optimiser un aspect particulier, tout en veillant à ce que l'ensemble du système ne soit pas compromis ou qu'il en découle des comportements émergents indésirables.

Pour compléter le travail de (Haskins, 2005) sur les patrons, (Schindel, 2005) propose un paradigme d'ingénierie, dans lequel les patrons sont des modèles réutilisables, nommé PBSE (*Pattern-Based Systems Engineering*). Au sein de l'INCOSE, un groupe de travail (appelé « *MBSE Patterns* ») s'intéresse à la

configuration et à l'intégration de patrons dans des lignes de produits. Les auteurs de (Schindel & Peterson, 2013) développent cette approche et l'appliquent aux exigences et durant la conception. À un haut niveau d'abstraction, ils développent un modèle de patron système générique qui peut être personnalisé pour les besoins, la configuration ou l'utilisation d'une entreprise, afin que les ingénieurs puissent bénéficier des concepts de l'ISBM sans être expert des méthodes de modélisation. (Cook & Schindel, 2017) l'appliquent lors des phases de validation et de vérification et (Bradley et al., 2010) sur une application dans le marché pharmaceutique.

2.3.3. Limites de patrons en Ingénierie Système Basée sur les Modèles

Les patrons en ISBM ont les mêmes limitations qu'en IS. Cependant, l'acte de modélisation induit des limitations spécifiques qu'il faut prendre en compte. C'est le cas notamment lorsqu'une entreprise souhaite masquer certains aspects d'un modèle à son client. Cela arrive fréquemment dans le cadre d'une relation client-fournisseur, il convient alors de pouvoir masquer certains éléments de propriété intellectuelle afin de ne pas livrer tout son savoir-faire. L'une des difficultés réside donc dans la capacité à masquer les patrons (qui encapsulent le savoir-faire de l'entreprise). C'est l'une des capacités qui seront cruciales à développer afin de favoriser l'adoption de l'ISBM et notamment l'utilisation de patrons pour la réutilisation de modèles.

Les patrons en ISBM ont également des limitations spécifiques dues à la réutilisation des modèles. D'une part, l'interopérabilité entre les outils n'est pas encore suffisamment mature, ce qui signifie qu'il est très difficile de transférer un modèle dans un outil différent de celui dans lequel il a été créé. D'autre part, les langages de modélisation actuellement disponibles ne sont pas encore bien définis en termes de syntaxe et de sémantique. Cela a amené de nombreux utilisateurs à faire des choix et à personnaliser ces langages pour répondre à leurs besoins. Cela a généré une forte divergence dans la façon d'exprimer les actifs d'ingénierie, réduisant ainsi la possibilité de les réutiliser tels quels. Cependant, certaines recherches ont montré qu'il était possible de réduire cet écart en introduisant davantage de formalisation dans le processus de conception d'IS via la définition d'une ontologie formalisant les concepts clés (Chalé et al., 2011). De ce fait, la future version 2 de SysML (OMG 2017b) souhaite également faire converger les différents concepts vers une compréhension commune.

Enfin et surtout, que ce soit pour les modèles ou les patrons, une réutilisation efficace ne peut avoir lieu que si le processus mis en œuvre a atteint un niveau de maturité suffisant. Ce niveau doit fournir à l'utilisateur un niveau de confiance suffisant pour réutiliser un patron sans erreur ni ambiguïté. Une première étape consiste à évaluer la maturité des patrons capitalisés. Cela est fait par exemple, dans le domaine des systèmes de production automatisés, par les auteurs de (Vogel-Heuser et al., 2018), sur la maturité des modules de contrôle dans les bibliothèques, ou encore, par les auteurs de (Gaskell & Harrison, 2019) qui ont défini des mesures de maturité de modèle afin d'améliorer la capacité à évaluer la maturité d'un modèle pour les revues techniques d'IS (*Systems Engineering Technical Review – SETR*). Une deuxième étape consiste à améliorer la maturité générale des approches de réutilisation, comme le font les auteurs de (Manzoni & Price, 2003) qui utilisent des métriques inspirées du *Capability Maturity Model (CMM)*.

Toutes les limitations mentionnées sont des obstacles à la création d'un cadre d'ISBM qui encouragera l'utilisation de patrons comme guide pour le développement de systèmes complexes. Une fois ces limitations résolues d'un point de vue méthodologique, il restera encore du travail à faire pour implémenter ces fonctionnalités dans un outil et les rendre «conviviales» pour les utilisateurs finaux.

Conclusion : positionnement scientifique

Comme cela a été développé dans ce chapitre, le principal problème des ingénieurs système est de raccourcir la période des cycles d'ingénierie. Ainsi, la modélisation de systèmes devient un élément de plus en plus important de tout projet d'ingénierie des systèmes (Holt et al., 2015), même si son adoption découle souvent d'une décision stratégique prise au niveau de l'entreprise. Pour une adoption plus large de l'ISBM, ce chapitre a mis en évidence la forte nécessité méthodologique de capitaliser sur les projets antérieurs afin de réutiliser les connaissances et le savoir-faire pour les nouveaux projets. Ces notions, qui se retrouvent en « *Knowledge Based Engineering* » (KBE) par exemple (La Rocca, 2012), participent à l'amélioration de l'efficacité de l'ingénierie lorsqu'elles sont intégrées dans des approches méthodologiques permettant de les capitaliser. Cependant, le KBE s'intéresse principalement aux approches de Conception Assistée par Ordinateur (CAO) et moins à l'architecture système. Dans l'objectif de soutenir la transition vers l'ISBM, ce chapitre passe en revue les pratiques actuelles de réutilisation, en se concentrant sur le concept de patron.. En effet, ce concept offre la possibilité de rendre l'information dynamique entre les parties prenantes lors du développement de systèmes complexes, afin de la partager et de favoriser sa réutilisation pour des projets futurs. Ainsi, plusieurs travaux de recherche ont été rapportés dans la conception et l'application d'une réutilisation des connaissances et du savoir-faire s'intégrant dans une démarche d'ISBM. L'adoption de cette méthodologie grâce aux patrons a été discutée, puisqu'ils semblent être des éléments clés pour une Ingénierie Système efficace. Dans ces travaux, nous distinguerons les patrons de conception, vu comme des guides pour le « système à faire » (système d'intérêt), et les patrons méthodologiques, vu comme des guides pour le « système pour faire » (organisation du projet).

D'un point de vue méthodologique, des améliorations doivent être apportées aux processus, méthodes et outils. En « *Knowledge Management* » (KM), de nombreuses approches proposent des approches de capitalisation et de réutilisation (Aries et al., 2008; Schreiber et al., 2001), mais peu formalisent ces processus dans un cadre ISBM. Or, dans notre contexte, une activité de capitalisation démarre à partir de modèles exploitables. Cela nécessite donc le déploiement de méthodes spécifiques pour la détection et l'extraction des connaissances et du savoir-faire. Une première étape consiste à évaluer la maturité de tels modèles capitalisés, comme dans le domaine des systèmes de production automatisés par (Vogel-Heuser et al., 2018) sur la maturité des modules de commande dans les bibliothèques. Une deuxième étape consiste à améliorer la maturité générale des approches de réutilisation, comme dans le domaine des logiciels par (Manzoni & Price, 2003), en se basant, par exemple, sur des métriques inspirées de modèles de maturité comme le CMM (*Capability Maturity Model*). Afin de privilégier une approche de capitalisation et de réutilisation planifiée et non opportuniste, il est également nécessaire de formaliser la démarche à suivre. La prochaine étape pour améliorer l'efficacité de l'ingénierie concerne donc la formalisation, le développement et l'adoption de processus, de méthodes et d'outils logiciels en ISBM intégrant des bibliothèques de patrons prenant en charge leur capitalisation, leur sélection, leur réutilisation et leur mise à jour.

Chapitre 3.

Valorisation des actifs d'ingénierie pour faciliter la transition vers l'Ingénierie Système Basée sur les Modèles

Sommaire du chapitre

3.1. Évaluation de la maturité du processus de réutilisation	73
3.1.1. Intérêts de l'évaluation de la maturité	73
3.1.2. Échelles de maturité.....	73
3.1.3. Proposition d'une évaluation de la maturité de la valorisation des actifs d'ingénierie	75
3.1.4. Introduction du concept de patron	82
3.2. Formalisation de niveaux d'abstraction	82
3.2.1. Définitions des niveaux d'abstraction.....	82
3.2.2. Transitions entre niveaux d'abstraction.....	86
3.2.3. Maturité des « patrons »	89
3.3. Contribution méthodologique proposée	91
3.3.1. Vue de haut niveau de l'approche MMIP	92
3.3.2. Processus stratégique de l'approche MMI.....	94
3.3.3. Processus Opérationnel de l'approche MMI	97
3.4. Décision de capitaliser	102
3.4.1. Accompagner la transition vers l'ISBM	102
3.4.2. Un potentiel de réutilisation.....	103
3.4.3. ... assez peu exploité	104

Introduction

Le chapitre précédent a permis de montrer l'importance de la modélisation pour réduire les durées des cycles d'ingénierie. Il a également été montré qu'il fallait disposer d'une méthodologie pour capitaliser et réutiliser du savoir-faire afin de faciliter la démarche de modélisation. Cette vision promeut au niveau de l'entreprise la création par capitalisation d'une base commune de savoir-faire, qui pourra être partagée. De plus, cela permet de prévenir certains risques liés, par exemple, aux départs d'employés « experts » (Cloutier, 2005), au syndrome de la page blanche, au « copier-coller » (Darimont et al., 2017), à l'impression de « réinventer la roue », ou encore à la déviation des besoins et des exigences (Gasser, 2012). Ainsi, le déploiement d'une approche de réutilisation de savoir-faire dans un cadre d'ISBM se doit, d'une part, de répondre aux besoins de capitalisation, de sélection de réutilisation et de mise à jour, et d'autre part, se doit de répondre aux questions suivantes :

- Qu'est-ce qui doit être capitalisé ?
- Sous quelle forme le savoir-faire doit-il être capitalisé ?
- Quelle approche de réutilisation doit être entreprise dans un cadre d'ISBM ?

L'objectif de ce chapitre est de proposer, d'une part, une échelle de maturité pour l'évaluation des processus de réutilisation, d'autre part, une formalisation de niveaux d'abstraction pour le concept de patron, et, finalement, une contribution méthodologique visant à promouvoir et faciliter la réutilisation de modèles en s'appuyant sur le concept de patron.

3.1. Évaluation de la maturité du processus de réutilisation

3.1.1. Intérêts de l'évaluation de la maturité

Les chapitres précédents ont permis de démontrer l'importance de la valorisation des actifs d'ingénierie pour faciliter le déploiement d'une démarche de modélisation. Ce processus de valorisation consiste à mettre en valeur le savoir-faire d'ingénierie, en vue de le disséminer aux autres ingénieurs. L'objectif est ainsi de mettre en place un processus de réutilisation systématique afin de réaliser des gains importants en matière de productivité et de qualité de développement (Garcia et al., 2007).

Cependant, la mise en place d'une capitalisation et d'une réutilisation systématique nécessite de mesurer la maturité de ce processus à un instant donné. Le développement d'une échelle fournira un cadre pour l'évaluation du niveau de maturité d'une organisation. Elle permettra de déterminer l'effort à fournir pour monter en maturité et améliorer l'efficacité du processus de valorisation d'actifs d'IS. Cette proposition est détaillée dans les sous-sections suivantes.

3.1.2. Échelles de maturité

Il existe dans la littérature un ensemble de modèles de maturité, proposés pour répondre à des problématiques précises. Par exemple, des travaux de recherche dans

la communauté du logiciel ont proposé divers modèles et pratiques pour mener à bien les activités de réutilisation. Ainsi, le *Reuse Capability Model* (RCM) fournit une méthode pour déterminer la capacité de réutilisation des activités logiciels d'une organisation (Rine & Sonnemann, 1998), en définissant cinq niveaux pour évaluer et planifier les améliorations à apporter à la capacité de réutilisation d'une entreprise. Les niveaux sont définis du plus bas (niveau 1) au plus haut (niveau 5) :

Tableau 3. Niveaux de maturité de l'échelle RCM, adapté de l'anglais depuis (Rine & Sonnemann, 1998)

Niveau 1	Ad hoc – pas de processus de réutilisation
Niveau 2	Opportuniste – librairies en support des projets
Niveau 3	Intégrée – processus de réutilisation et de développement intégrés
Niveau 4	Exploitée – cycle de vie de ligne de produits distinctes avec des processus spécialisés
Niveau 5	Anticipée – chaque projet optimise la réutilisation

Cependant, comme les auteurs de l'échelle le précisent eux-mêmes, il est nécessaire de mesurer d'autres aspects afin de pouvoir réellement évaluer le niveau de réutilisation d'une organisation. Il est nécessaire de réaliser cette évaluation dans plusieurs dimensions, ce qui implique qu'un modèle de maturité complet doit couvrir plusieurs critères. Ainsi, il sera possible de créer une corrélation entre les différents axes afin d'obtenir un résultat le plus proche possible de la réalité. En ce sens, le modèle de maturité RiSE proposé par (Garcia et al., 2007) comprend quatre perspectives traitant des problèmes d'organisation, d'entreprise, de technologie et de processus. Le modèle de maturité RiSE a pour objectif principal de prendre en charge l'adoption et la mise en œuvre incrémentale de pratiques de réutilisation de logiciels. Des travaux plus récents de (Younoussi & Roudies, 2016) ont compilé et comparé des modèles de maturité, pour fournir une classification de chaque modèle en fonction de critères et de paramètres. Ainsi, leurs travaux démontrent que la démarche de réutilisation à appliquer doit s'adapter à l'objectif visé. Comme l'une des hypothèses de la thèse présentée dans ce manuscrit est que le savoir-faire peut être capitalisé sous la forme de patrons, il est donc nécessaire d'adapter le modèle de maturité au concept de patron.

Dans la communauté IS, différents modèles de maturité ont également été proposés et évalués. Par exemple, (Cornu et al., 2012) ont proposé d'utiliser un modèle de maturité pour évaluer la capacité d'une organisation et de ces composantes à déployer les différents processus d'IS. Pour le déploiement de l'ISBM en entreprise, (Demirci, 2010) a également proposé un modèle de maturité pour déterminer la capacité à utiliser l'ISBM comme approche d'ingénierie. À chaque niveau, des indicateurs de maturité sont associés à différents aspects spécifiques de la modélisation (processus de modélisation, qualité du modèle, compétences, outils...).

En revenant un peu en arrière, un autre modèle de maturité pour l'IS, le *Systems Engineering Capability Maturity Model* (SE-CMM) (Software Engineering Institute, 1995) a été mis au point : il décrit les éléments essentiels à intégrer dans les processus d'IS d'une entreprise afin de garantir une bonne ingénierie des systèmes. Puis, le CMM a évolué en *Capability Maturity Model Integration* (CMMI) (Software Engineering Institute, 2010), qui comprend également les aspects « systèmes » pour les développements. Cependant, dans le CMMI et comme dans les modèles de maturité présentés précédemment, les aspects valorisation et réutilisation d'actifs d'ingénierie ne sont pas présents ou étudiés. En effet, le périmètre d'évaluation de ces modèles de maturité réduit la réutilisation à un seul indicateur, sans donner de critères permettant d'évaluer le niveau de maturité atteint.

Il est donc nécessaire de fournir la capacité aux entreprises d'évaluer leur niveau de performance sur leur processus de réutilisation et ainsi mettre à leur disposition des recommandations pour les améliorer. Pour ce faire une échelle de maturité dédiée est proposée ci-dessous.

3.1.3. Proposition d'une évaluation de la maturité de la valorisation des actifs d'ingénierie

Face à l'ensemble des données disponibles, il est nécessaire d'identifier les actifs d'ingénierie qui auront suffisamment de valeur pour être réutilisés. Sinon, la réutilisation se fait au détriment de la compréhension des objets manipulés et dessert finalement l'utilisateur final par un manque de valeur ajoutée (Niu et al., 2013). Il faut donc avoir appliqué une démarche de capitalisation préalablement à l'application d'une démarche de réutilisation. Autrement dit, la mise en place d'un processus de réutilisation ne peut se faire indépendamment d'un processus de capitalisation.

Dans ce manuscrit, comme il a été démontré dans la sous-section précédente, il est nécessaire d'étudier différents aspects du processus de réutilisation, afin de disposer d'une vision complète. Ces travaux proposent, dans un premier temps, une échelle de maturité multi-axiale, dont chaque axe est composé de 6 niveaux de maturité (Figure 22).

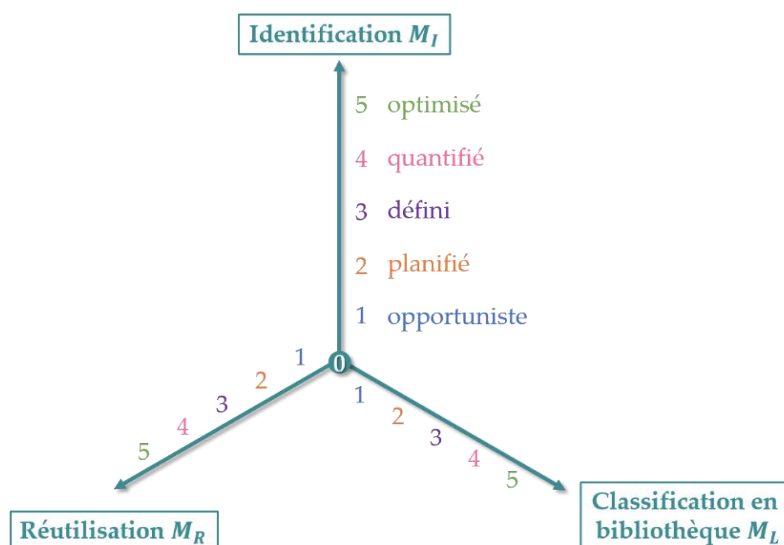


Figure 22. Échelle de maturité pour la valorisation des actifs d'IS

Entre les processus de capitalisation et réutilisation, un processus de classification des actifs d'ingénierie en bibliothèque est intercalé afin de créer un catalogue facilement appréhendable par l'utilisateur final, dans lequel il pourra se retrouver et qui facilitera la réutilisation des actifs d'ingénierie. Cela permet de couvrir l'ensemble de la démarche de valorisation d'actifs d'IS.

Dans un premier temps, ces niveaux permettent d'évaluer les niveaux individuels de maturité qui sont spécifiques aux processus d'Identification, de Classification en librairie et de Réutilisation (M_I, M_L, M_R). Dans un second temps, les niveaux sur chaque axe permettent de calculer un niveau global de maturité (M_{VSEA}). Bien que cette échelle de maturité s'inspire du CMMI, elle propose d'adapter les niveaux de maturité proposés afin de les rendre spécifiques aux besoins relatifs à la valorisation des actifs d'IS (Tableau 5 – page suivante).

3.1.3.1. Niveau de maturité 0 – Pas de réutilisation

Aucune action de réutilisation n'est réalisée au niveau de l'entreprise. L'identification d'actifs d'ingénierie n'a pas lieu au niveau des individus, ce qui n'a pas permis la prise de conscience de l'intérêt de réutiliser.

3.1.3.2. Niveau de maturité 1 – Réutilisation opportuniste

Aucune volonté de réutilisation n'existe au niveau de l'entreprise. Le périmètre de valorisation des actifs d'ingénierie concerne uniquement les ingénieurs. Ainsi, à leur échelle, aucune classification en librairie n'est réalisée, car ils utilisent seulement un petit ensemble d'actifs qui peut évoluer en fonction du projet. Le Tableau 4 donne des indicateurs de maturité permettant d'identifier des pratiques de niveau 1.

Tableau 4. Indicateurs de maturité pour le niveau 1

Identification	<ul style="list-style-type: none"> • Pas de processus/méthode définis • Pas d'objectif défini • Au bon vouloir de l'ingénieur (risque de manque de compétences)
Classification	<ul style="list-style-type: none"> • Pas de processus/méthode définis • Pas d'objectif défini • Pas de bibliothèque disponible ou • Pas de classement car identification en « <i>one shot</i> »
Réutilisation	<ul style="list-style-type: none"> • Pas de processus/méthode définis • Pas d'objectif défini • Réutilisation unique, pas ou peu de partage avec les autres ingénieurs

Tableau 5. Description de chaque niveau de maturité

		AXES		
		Identification	Classification en Bibliothèque	Réutilisation
NIVEAUX DE MATURITÉ	0	Pas d'identification d'élément réutilisable	Pas de classification en librairie	Pas de réutilisation d'élément provenant de précédents projets
	1 – Opportuniste	Identification opportuniste d'éléments réutilisables depuis d'anciens projets, sans méthode (vision incomplète)	Prise de conscience : « J'ai déjà vu quelque chose comme ça » ; Partage opportuniste d'éléments réutilisables à l'oral : « on a déjà fait comme ça », utilisation d'un dessin sur un tableau...	Réutilisation opportuniste par copier-coller depuis d'anciens projets, sans méthode ; adaptation manuelle
	2 – Planifiée	Identification planifiée d'éléments réutilisables, sans méthodes (vision incomplète)	Partage planifié d'éléments formalisés identifiés comme réutilisables (textes, modèles...)	Réutilisation planifiée par copier-coller depuis d'anciens projets, sans méthode ; adaptation manuelle planifiée
	3 – Définie	Méthode d'identification définie : classification en niveaux d'abstraction définis	Méthode de capitalisation définie : partage organisé à l'aide d'une structure adaptée	Méthode de réutilisation définie : sélection définie d'éléments réutilisables, transitions définies entre les différents niveaux d'abstractions
	4 – Quantifiée	Quantification de l'efficacité de la méthode d'identification définie (temps d'identification, coûts...)	Quantification de l'efficacité de la méthode de capitalisation définie (temps de classification, temps de recherche...)	Quantification de l'efficacité de la méthode de réutilisation définie (nombre d'utilisations, temps d'adaptation, nombre de recherches...)
	5 – Optimisée	Optimisation continue de la méthode d'identification	Optimisation continue de la méthode de classification	Optimisation continue de la méthode de réutilisation

3.1.3.3. Niveau de maturité 2 – Réutilisation planifiée (intention)

Aucune action de réutilisation n'est réalisée au niveau de l'entreprise. À ce niveau, le domaine est celui de l'intention et manque donc de structure. Le Tableau 6 donne des indicateurs de maturité permettant d'identifier des pratiques de niveau 2.

Tableau 6. Indicateurs de maturité pour le niveau 2

Identification	<ul style="list-style-type: none"> • Pas de processus/méthode définis • Objectifs définis • Volonté collective
Classification	<ul style="list-style-type: none"> • Pas de processus/méthode définis • Objectifs définis • Bibliothèques disponibles non structurées
Réutilisation	<ul style="list-style-type: none"> • Pas de processus/méthode définis • Objectifs définis • Réutilisation sans guide

3.1.3.4. Niveau de maturité 3 – Réutilisation définie

À ce niveau, les processus sont définis et la démarche s'applique au niveau de l'entreprise. Une bibliothèque est formalisée et partagée avec les différentes parties prenantes. Le Tableau 7 donne des indicateurs de maturité permettant d'identifier des pratiques de niveau 3.

Tableau 7. Indicateurs de maturité pour le niveau 3

Identification	<ul style="list-style-type: none"> • Processus/méthodes définis • Objectifs définis
Classification	<ul style="list-style-type: none"> • Processus/méthodes définis • Objectifs définis • Bibliothèques disponibles avec catégorisation et partagée
Réutilisation	<ul style="list-style-type: none"> • Processus/méthodes définis • Objectifs définis • Réutilisation avec guide

3.1.3.5. Niveau de maturité 4 – Réutilisation quantifiée

À ce niveau, un ensemble d'indicateurs de performances sont mesurés et mis à disposition pour les utilisateurs. Cela permet de mesurer des tendances, ainsi que les ressources et les temps de cycle d'ingénierie lors du développement. Le Tableau 8 donne des indicateurs de maturité permettant d'identifier des pratiques de niveau 4.

Tableau 8. Indicateurs de maturité pour le niveau 4

Identification	<ul style="list-style-type: none"> • Indicateurs du niveau 3 • Mesure du temps, du coût de capitalisation des actifs d'ingénierie
Classification	<ul style="list-style-type: none"> • Indicateurs du niveau 3 • Mesure du temps, du coût de classification, de recherche des actifs d'ingénierie
Réutilisation	<ul style="list-style-type: none"> • Indicateurs du niveau 3 • Mesure du nombre d'utilisations, du temps d'adaptation, du nombre de recherches, du temps de développement

3.1.3.6. Niveau de maturité 5 – Réutilisation optimisée

À ce niveau, les indicateurs de performances précédemment définis sont exploités afin de fournir des capacités prédictives aux outils utilisés. Cela permet d'optimiser les indicateurs de performances de la démarche en accélérant les cycles d'ingénierie et en guidant les utilisateurs lors du développement. Le Tableau 9 donne des indicateurs de maturité permettant d'identifier des pratiques de niveau 5.

Tableau 9. Indicateurs de maturité pour le niveau 5

Identification	<ul style="list-style-type: none"> • Indicateurs du niveau 4 • Capitalisation aidée par apprentissage de l'outil (plus rapide, plus mature)
Classification	<ul style="list-style-type: none"> • Indicateurs du niveau 4 • Adaptation automatique de la bibliothèque en fonction de l'utilisateur • Classement anticipable par l'outil
Réutilisation	<ul style="list-style-type: none"> • Indicateurs du niveau 4 • Réutilisation anticipable (reconnaissance de mots par exemple) par l'outil

3.1.3.7. Evaluation globale de la maturité

La particularité de cette échelle réside dans les liens de dépendance entre les différents axes. En effet, l'objectif final est de réutiliser des actifs d'ingénierie pour disséminer le savoir-faire, afin notamment de faciliter et accélérer les futurs développements. Or, la réutilisation d'actifs n'est possible que lorsque ceux-ci ont été d'abord identifiés. Dans le cas contraire, il est impossible de mesurer la valeur ajoutée apportée par la réutilisation. De plus, dans le cadre de systèmes techniques complexes, il est nécessaire de pouvoir classer ces actifs dans une librairie ou un catalogue afin de créer une base commune de savoir-faire pour la réutilisation dans les futurs projets. Il apparaît ainsi que l'axe « Identification » est le point de départ de l'approche méthodologique visée, et donc que le niveau de maturité de cet axe contraint les autres axes. Puis, vient l'axe « Classification en bibliothèque » qui permettra de pérenniser ce qui a été précédemment capitalisé, mais également de faciliter la recherche des actifs d'ingénierie. En effet, cela vient en support de l'axe suivant, celui sur la « Réutilisation ». Autrement dit, des règles intrinsèques aux maturités sur les différents axes de l'échelle émergent, telles que :

$$M_R \leq M_I \quad (1)$$

$$M_L \leq M_I \quad (2)$$

Ainsi, en raison de cette dépendance, seules certaines combinaisons de maturités sont possibles (Tableau 10). En effet, il ne peut y avoir de « réutilisation » au niveau maximum de maturité tant que les axes « identification » et « classement en librairie » n'ont pas également atteints un niveau suffisant de maturité.

Tableau 10. Combinaison possible des niveaux de maturité

M_I	M_L	M_R
1	1	1
2	1	1
2	2	1
2	2	2
3	2	2
3	3	2
3	3	3
4	3	3
4	4	3
4	4	4
5	4	4
5	5	4
5	5	5

Sur la base des ces différents niveaux de maturité qui ne peuvent, individuellement être satisfaisant, il faut être capable de calculer un niveau de maturité global du processus de valorisation d'actifs d'IS. En raison des liens de dépendances

entre chaque axe, il apparaît que le niveau de maturité global ne peut pas être supérieur au niveau de maturité le plus bas sur les axes. Dans ces conditions, il est possible de définir un niveau de maturité global pour la valorisation d'actifs d'IS (M_{VSEA}) tel que :

$$M_{VSEA} = \min(M_I, M_L, M_R) \quad (3)$$

Cependant, la prise en compte uniquement du plus mauvais niveau de maturité ne permet pas de fournir une évaluation suffisamment fine du niveau de maturité globale. Dans les cas suivants (Tableau 11), le niveau de maturité globale est toujours le même et ne prend pas en compte les niveaux de maturité de tous les axes.

Tableau 11. Exemple du calcul de niveau de maturité global avec la formule (3)

	M_I	M_L	M_R	M_{VSEA}
<i>Situation 1</i>	1	1	1	1
<i>Situation 2</i>	2	1	1	1
<i>Situation 3</i>	2	2	1	1

C'est pourquoi, afin d'affiner la mesure de maturité global, il est plus intéressant de prendre en compte les « avancées positives » selon chaque axe. Dans le cas trivial où $M_I = M_L = M_R$, il est évident que $M_{VSEA} = M_I = M_L = M_R$. Dans les autres cas, la formule (3) devient :

$$M_{VSEA} = \min(M_I, M_L, M_R) + \frac{M_I - M_L}{3} + 2 \times \frac{M_L - M_R}{3} \quad (4)$$

Ainsi, l'exemple donné en Tableau 11 devient :

Tableau 12. Exemple du calcul de niveau de maturité global avec la formule (3)

	M_I	M_L	M_R	M_{VSEA}
<i>Situation 1</i>	1	1	1	1
<i>Situation 2</i>	2	1	1	1,3
<i>Situation 3</i>	2	2	1	1,7

La formule (4) permet ainsi d'affiner le calcul de M_{VSEA} en fournissant une indication sur les efforts à réaliser pour le passage au niveau supérieur de maturité global. Ainsi, il est plus aisé d'atteindre $M_{VSEA} = 2$ dans la situation 3 par rapport à la situation 2, et ainsi de suite. L'ensemble des combinaisons et des valeurs de M_{VSEA} est donné en annexe A.

Cette échelle de maturité ainsi définie, les travaux de la thèse visent à proposer un guide pour atteindre un niveau de maturité suffisamment élevée pour favoriser l'utilisation de patrons pour la capitalisation et la réutilisation de savoir-faire. Il est considéré ici que le niveau de maturité couramment atteint en entreprise ne dépasse pas le niveau 1 ou 2 en raison du manque de ressources disponibles pour la définition d'une approche méthodologique permettant d'atteindre des niveaux plus élevés (avec *a minima* une définition des processus). C'est pourquoi les travaux de cette thèse

proposent dans la section suivante une approche méthodologique pour guider les ingénieurs métiers, méthodes... à mettre en place une méthode adaptée aux besoins d'agilité et de gestion de la complexité attendue par leurs clients.

3.1.4. Introduction du concept de patron

L'introduction du concept de patron, en tant que concept pivot pour la capitalisation et la réutilisation, nécessite de l'assimiler à un actif d'ingénierie. En effet, une fois formalisé, ce sera le concept de patron qui portera la valeur ajoutée d'ingénierie. Or, cette formalisation ne peut se réaliser sans approche méthodologique. La formalisation du concept de patron n'existe donc pas avant d'avoir atteint le niveau de maturité 3 (définie) car les processus et méthodes pour l'identification, la classification en bibliothèque et la réutilisation doivent nécessairement avoir été définis.

Dans l'échelle de maturité proposée, le niveau 3 est ensuite la base qui sert à atteindre les niveaux supérieurs de maturité. Autrement dit, le niveau 3 est en quelque sorte la « porte d'entrée » aux niveaux supérieurs et le premier niveau à partir duquel le concept de patrons peut exister. Ces travaux ont donc pris pour objectif l'atteinte de ce niveau de maturité, qui correspond aux problématiques explicitées en chapitre I.

L'objectif des sections suivantes est donc d'introduire des mécanismes permettant d'atteindre l'objectif de maturité sur chacun des axes de l'échelle proposée. Dans un premier temps, des niveaux d'abstraction sont introduits afin de caractériser le type d'un patron, et donc les niveaux de capitalisation et de réutilisation atteignables avec son utilisation. En s'appuyant sur ces niveaux, une approche méthodologique est ensuite proposée. Elle se veut un guide méthodologique pour la valorisation d'actifs d'IS à l'aide du concept de patrons.

3.2. Formalisation de niveaux d'abstraction

L'atteinte du niveau 3 de maturité nécessite d'avoir des processus et des méthodes définies pour l'identification, la classification en bibliothèque et la réutilisation. Il convient donc de définir les objets qui seront manipulés, et pour cela, nous proposons de les hiérarchiser en fonction de leurs niveaux d'abstraction. En premier lieu, la définition de chacun des niveaux d'abstraction sera réalisée, puis les transitions entre ces niveaux seront explicitées.

3.2.1. Définitions des niveaux d'abstraction

Durant la phase de conception d'un système complexe, il est important et nécessaire de prendre du recul afin d'avoir une vision d'ensemble permettant d'assurer sa cohérence globale. C'est l'un des principes mis en avant dans la « Pensée Système » (Boardman et al., 2009) qui permettent notamment d'éviter « l'effet tunnel ». Pour faciliter cette prise de recul, il est possible de changer de point de vue, ou encore, de monter en niveau d'abstraction sur les artefacts d'ingénierie utilisés. Dans ces travaux, nous nous intéressons aux artefacts de modélisation et à la manière de les appréhender selon le niveau d'abstraction employé. Nous proposons donc de définir quatre niveaux d'abstraction afin de situer le concept de patron par rapport aux modèles des systèmes. Ces quatre niveaux sont introduits dans la Figure 23, et présentés dans les sections

suivantes. Ils commencent par le « modèle » au niveau d'abstraction le plus bas, et se terminent au « patron abstrait » au niveau d'abstraction le plus haut.

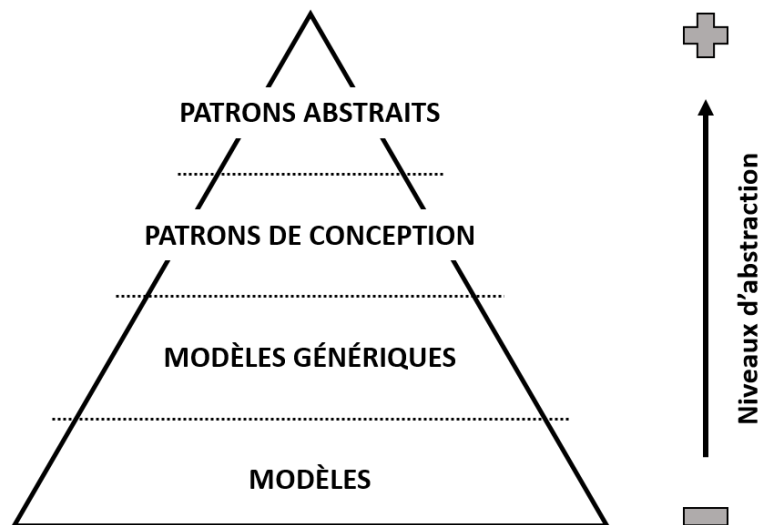


Figure 23. Niveaux d'abstractions pour les modèles dans un contexte d'ISBM

3.2.1.1. Modèles

Les modèles sont le résultat des processus d'ingénierie et leur niveau de maturité est directement lié au savoir-faire des ingénieurs. Chaque projet a bien souvent ces modèles propres, exprimés dans un langage d'ingénierie spécifique. La Figure 24 présente un exemple d'architecture fonctionnelle, exprimée à gauche via le langage SysML, et à droite dans un langage de modélisation interne SEP. L'une des différences majeures est la présence de port sur les fonctions dans le langage SysML.

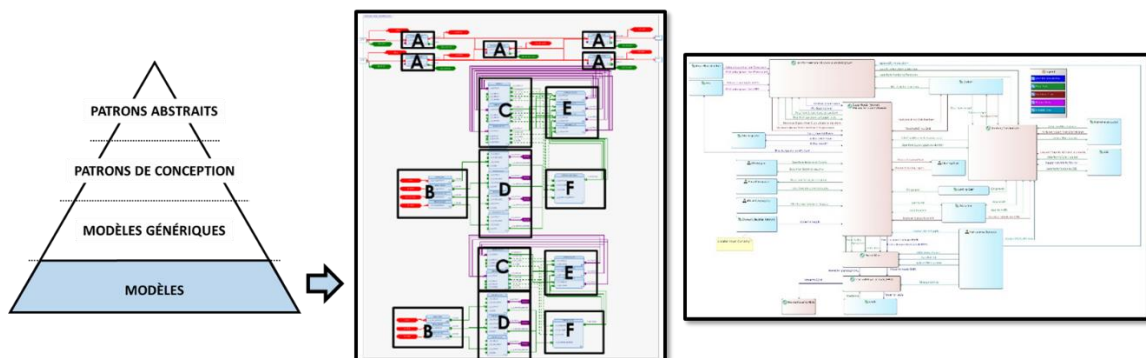


Figure 24. Exemples de modèles

Ces ensembles de modèles, différents sur chaque projet, sont donc isolés en « silos » et non homogène, puisqu'il n'existe aucune règle commune de modélisation (syntaxe, sémantique, règle de nommage, etc...).

3.2.1.2. Modèles génériques

Les modèles génériques sont également exprimés dans un langage de modélisation spécifique au domaine d'ingénierie. Cependant, contrairement au niveau du dessous, les modèles génériques ont pour objectif de mettre en lumière les similarités et la répétition de motifs de conception dans les systèmes et les projets. Il

peut s'agir d'exigences, d'interfaces, de fonctions... L'idée est de généraliser des modèles à un niveau plus élevé d'abstraction, afin d'en systématiser une manière de les concevoir lors du processus d'instanciation, mais également afin d'améliorer la lecture et la compréhension des modèles (précédent niveau d'abstraction). Sur la Figure 25, que des modèles génériques ont permis de réduire la taille et la complexité de lecture des modèles de la Figure 24, notamment par factorisation des fonctions. La mise en valeur d'une fonction générique (qui contient des paramètres instanciables) et non de ces instanciations constitue une première étape d'abstraction.

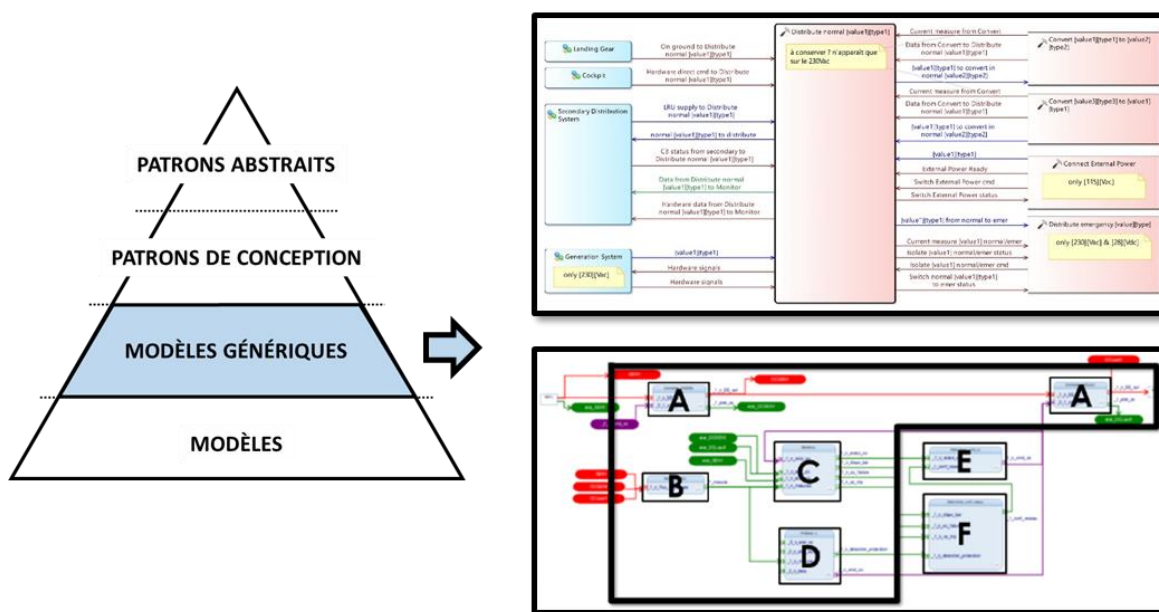


Figure 25. Exemples de modèles génériques

3.2.1.3. Patrons de conception (*design patterns*)

La description d'un patron de conception doit se faire indépendamment du langage de modélisation employé par le domaine d'ingénierie. En effet, il est impératif d'arriver à un niveau d'abstraction où les objets encapsulant le savoir-faire sont indépendants des outils utilisés par les ingénieurs. Autrement dit, le savoir-faire d'ingénierie n'est pas dépendant des outils utilisés. L'intérêt du patron de conception est donc de décrire les éléments à réutiliser dans le processus de réutilisation, en s'affranchissant des contraintes outils métiers. Il est donc nécessaire de capturer le savoir-faire, dans un formalisme qui est indépendant du contexte de chaque domaine d'ingénierie (méta-modélisation), afin d'en faciliter sa promotion et sa réutilisation. Cependant, ces patrons restent décrits et adaptés à un domaine précis (Figure 26). Les mécanismes qui permettront de construire ces patrons de conception seront explicités en section 3.2.2.1 ainsi que dans la section 4.2.

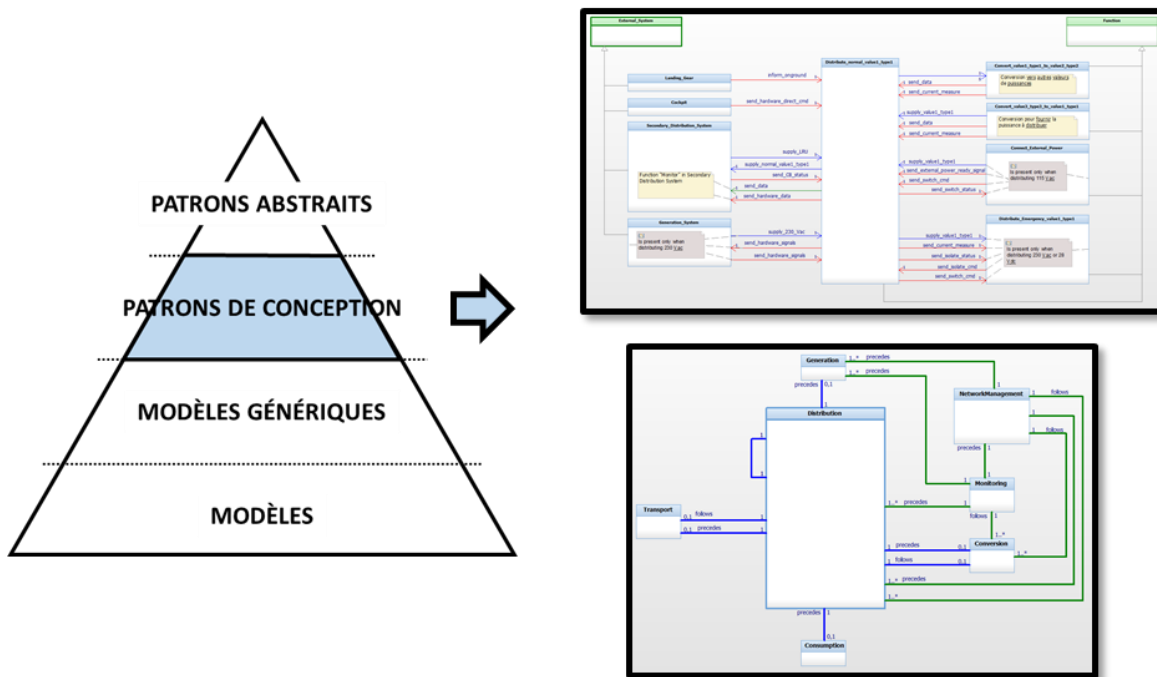


Figure 26. Exemples de patrons de conception

3.2.1.4. Patrons abstraits

Les patrons abstraits sont indépendants des outils et langages des divers domaines d'ingénierie. Ils peuvent être des principes généraux (comme par exemple l'actinomie « préparer – réaliser – clôturer » (Vogel, 1988)), des concepts d'architecture ou encore des représentations permettant de faciliter la communication sur un système (Figure 27). Les patrons abstraits peuvent donc être tirés de la littérature ou bien d'une abstraction réalisée à partir de patrons de conception. Ce niveau, très conceptuel, est porteur du savoir-faire de l'entreprise et permet de décrire des invariants de conception qui permettent de structurer la pensée. Cela facilite également la transmission de ce savoir-faire en plus de fournir des principes généraux de structuration assez faciles à comprendre.

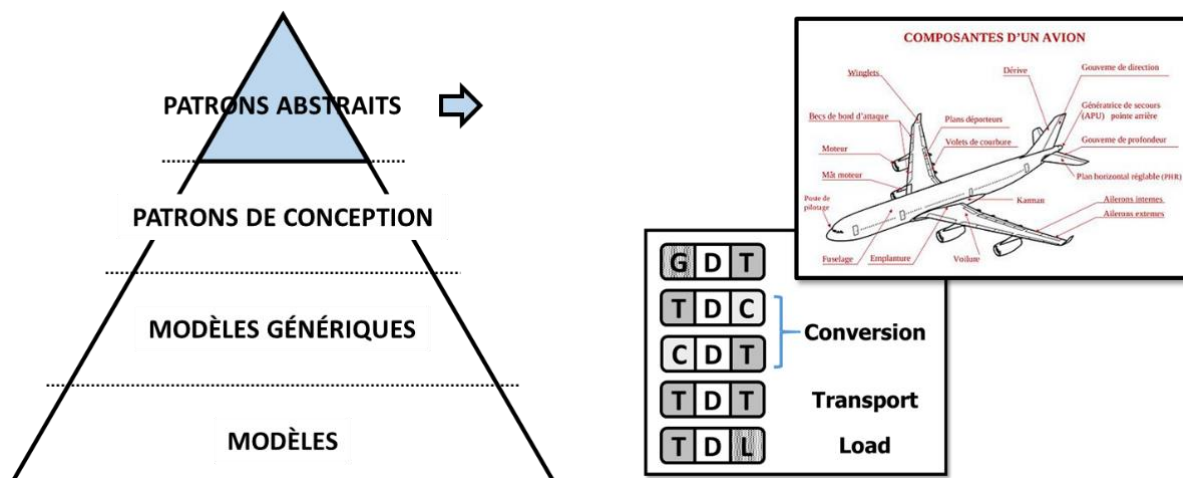


Figure 27. Exemples de patrons abstraits

3.2.2. Transitions entre niveaux d'abstraction

La description en 4 niveaux d'abstraction (Figure 23) implique la nécessité de définir le passage entre les différents niveaux. Ces niveaux étant classés de manière hiérarchique, il est possible de définir deux possibilités de transition (Figure 28) :

- Une approche montante (« *bottom-up* ») qui correspond à un processus de minage (DeLano, 1998; Hanmer & Kocan, 2004; Haskins, 2007), présentée en section 3.2.2.1.
- Une approche descendante (« *top-down* ») qui correspond à un processus d'implémentation, qui sera présentée en section 3.2.2.2.

La capitalisation consiste à monter en abstraction, et la réutilisation consiste en une descente en abstraction afin de répondre à la spécificité d'un système.

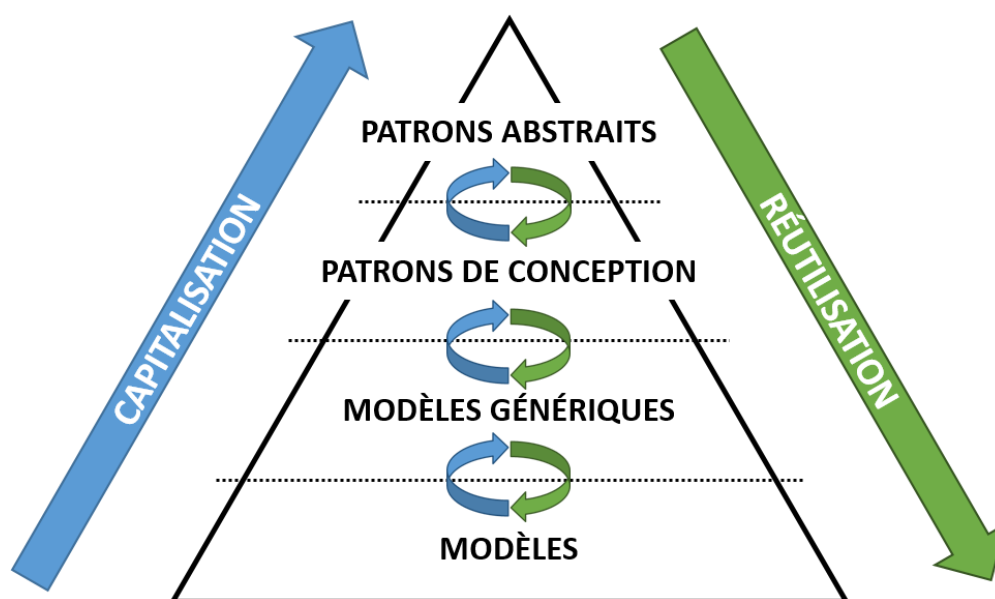


Figure 28. Processus de capitalisation et de réutilisation

Il faut néanmoins noter que ces processus montants et descendants ne sont pas figés et sont décomposables en sous-processus afin de rester flexibles et pouvoir répondre à des besoins spécifiques (Figure 29). Il n'est pas nécessaire de réaliser l'ensemble du processus de minage depuis les modèles jusqu'au patron abstrait. En effet, si un niveau d'abstraction intermédiaire suffit, il convient de s'arrêter à celui-ci. Nous présenterons néanmoins l'intérêt dans la suite de dérouler un processus complet.

Pour chaque transition, il est préférable de se concentrer sur un type d'artefacts d'ingénierie à la fois (cas d'utilisation, fonctions, composants...), ou sur plusieurs artefacts qui appartiennent à la même vue du système (contexte, architecture fonctionnelle, organique...). En effet, il sera plus simple d'assurer la cohérence à chaque niveau d'abstraction, et il sera tout à fait possible de réaliser le travail de traçabilité dans un second temps. Cet aspect est détaillé dans le Chapitre 4 à la sous-section 4.1.1.3.

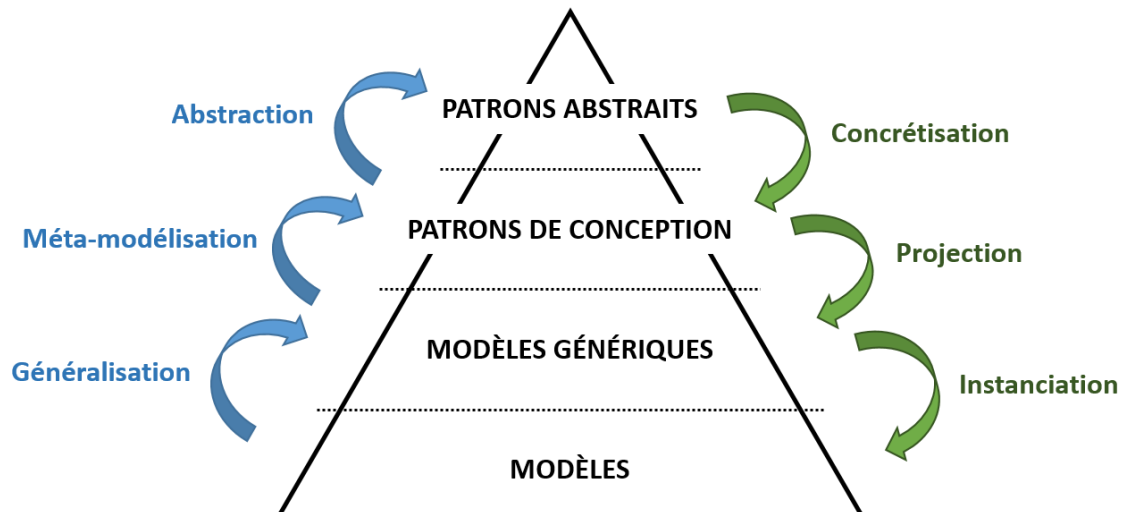


Figure 29. Sous-processus de capitalisation et de réutilisation

3.2.2.1. Montée en abstraction

Les sous-processus permettant la montée en abstraction (Figure 29) fournissent des moyens pour capitaliser le savoir-faire. Lors de la première itération de la démarche, l'objectif est de partir des modèles spécifiques disponibles afin d'en identifier et d'en extraire des similarités et des motifs récurrents d'ingénierie. Cette analyse permettra d'extraire des éléments ayant de la valeur ajoutée dans les modèles.

Modèles vers modèles génériques – généralisation

Lors de la transition « généralisation », il est important d'identifier la répétition d'artefacts ou de groupes d'artefacts de modélisation. Parfois, il peut s'agir de mettre en lumière une séquence d'artefacts (une chaîne fonctionnelle par exemple). Il faut également être attentif aux « signatures » informelles de modélisation. Ces signatures sont des marques ou éléments distinctifs réalisés par la personne qui modélise dans le but soit de mettre en lumière une information importante, soit d'empêcher une erreur fréquente. Par exemple, la hiérarchisation et la mise en page d'un diagramme, peuvent être autant d'indices sur des choix de conception provenant du retour d'expérience de précédents projets. Or, ces choix, bien qu'apparaissant dans les modèles, ne sont pas formalisés. La réussite d'un processus de capitalisation est liée à la qualité de l'extraction et de la formalisation des similarités et motifs d'ingénierie identifiables.

Modèles génériques vers Patrons de conception – méta-modélisation

Lors de la transition « méta-modélisation », il est nécessaire d'isoler les concepts qui ont besoin d'être capitalisés. Par exemple, dans une architecture fonctionnelle, il est possible de capitaliser les fonctions (entrées, sorties, interfaces), mais également la structure (décomposition fonctionnelle) ou bien une chaîne fonctionnelle spécifique... Selon les besoins, chacun de ces aspects aura peut-être besoin d'être capitalisé, cependant, il est important de préciser qu'il sera nécessaire de créer un patron pour chaque concept.

Patrons de conception vers patrons abstraits – abstraction

L'objectif est de se libérer de règles trop strictes sur la syntaxe et la sémantique afin de créer un nouveau medium descriptif permettant de faciliter la compréhension du concept capitalisé. Pour expliquer des chaînes fonctionnelles qui fonctionnent en suivant des règles sur les enchaînements, il est par exemple possible d'utiliser le concept de dominos. Il est également possible de représenter des concepts d'architecture de manière plus formelle (diagrammes, schémas...) afin d'en faciliter la compréhension.

3.2.2.2. Descente en abstraction

Les processus permettant la descente en abstraction (Figure 29) fournissent des moyens pour réutiliser et implémenter le savoir-faire. Cette redescente en abstraction peut faire suite à la capitalisation, ou prendre comme point de départ, un patron abstrait ou de conception disponible dans la littérature.

Patrons abstraits vers patrons de conception – concrétisation

L'objectif est de traduire des éléments dans un langage où la syntaxe et la sémantique seront rigoureusement décrites. Dans le cas de patrons abstraits qui ne sont pas issus de la démarche de montée en abstraction de la sous-section 3.2.2.1, la traduction dépend alors de l'expressivité du langage de modélisation sélectionné à ce niveau. Sinon, les patrons de conception sont déjà existants.

Patrons de conception vers modèles génériques – projection

L'objectif est d'implémenter les patrons de conception dans un langage spécifique d'ingénierie afin de construire des modèles génériques. Là encore, le langage de modélisation retenu aura un impact sur l'expressivité des modèles génériques.

Modèles génériques vers modèles – instantiation

L'objectif est de réussir à faciliter le « paramétrage » des modèles génériques en modèles spécifiques. Il est nécessaire de rapidement contextualiser les modèles aux besoins des ingénieurs afin de ne pas faire de l'action de modélisation une charge, mais un support à leurs activités.

3.2.2.3. Utilisateurs des différents niveaux d'abstractions

Une fois les différents niveaux d'abstraction et leurs transitions définis, il convient de se poser la question des rôles à définir, afin que chaque utilisateur puisse trouver le niveau d'information dont il a besoin.

Il est assumé dans ces travaux que différentes parties prenantes pourront se servir des artefacts définis :

- Les ingénieurs/architectes système
- Les ingénieurs méthodologie ISBM

Chaque partie prenante peut jouer deux rôles, et vont se les échanger en fonction du niveau d'abstraction et des transitions à réaliser. Le premier rôle consiste à être garant (« responsable ») des artefacts d'ingénierie et des transitions entre niveaux

d'abstraction, tandis que le second correspond à un rôle d'expertise (« support ») métier ou méthodologique.

Ces rôles sont résumés dans le Tableau 13. Il est important de noter que si les modèles et modèles génériques sont de la responsabilité des ingénieurs/architectes système, les patrons de conception et abstraits aux sont de la responsabilité des ingénieurs méthodologie. Les patrons sont donc des objets dont le périmètre est principalement méthodologique, car ne devant pas rajouter de la complexité lors du développement. En effet, pour ne pas créer d'ambiguïté, et afin de pouvoir laisser les ingénieurs se concentrer uniquement sur la conception du système, nous estimont qu'ils ne doivent pas manipuler les concepts de patrons de conception et abstraits. Il est néanmoins primordial qu'ils sachent et comprennent la démarche globale, afin de pouvoir déclencher et aiguiller la création de ces patrons. C'est pourquoi une inversion est visible à partir du sous-processus méta-modélisation dans le Tableau 13.

Tableau 13. Répartitions des rôles selon les transitions et les niveaux d'abstraction

	Ing./arch. système	Ing. méthodologie
Patrons abstraits	support	responsable
<i>Abstraction / Concrétisation</i>	support	responsable
Patrons de conception	support	responsable
<i>Méta-modélisation / Projection</i>	support	responsable
Modèles génériques	responsable	support
<i>Généralisation / Instanciation</i>	support	responsable
Modèles	responsable	support

La répartition des rôles doit être claire afin de garantir la cohérence et la complétude de l'approche. Cela nécessite d'avoir une vision globale sur l'ensemble de la chaîne de capitalisation et de réutilisation. A cette fin, la section 3.3 présente une approche méthodologique de valorisation des actifs d'ingénierie à l'aide de patrons. Avant d'introduire cette dernière, une discussion sur la maturité de chacun des niveaux d'abstraction est réalisée dans la sous-section suivante.

3.2.3. Maturité des « patrons »

Différents niveaux d'abstractions ainsi que les transitions entre ces niveaux ont été définis afin de caractériser les différentes aspects du concept de « patron ». Désormais, il faut s'assurer que le passage entre chaque niveau a été correctement réalisé en déterminant le niveau de maturité des patrons, autrement dit, des différents niveaux définis. Ce niveau de maturité peut s'apparenter au niveau de confiance qui est

placé dans ces patrons pour la capitalisation et la réutilisation. En ce sens, différentes caractéristiques sont à définir pour chaque niveau d'abstraction.

3.2.3.1. Patron abstrait

La définition d'un cadre strict pour évaluer la maturité d'un patron abstrait s'oppose à la définition même de ce niveau d'abstraction. En effet, il risque d'être relativement difficile de cadrer un artefact abstrait, dont l'objectif est surtout d'être pédagogique dans sa description. Du point de vue des travaux menés dans la thèse, la maturité d'un patron abstrait se doit d'être évalué en fonction du message à transmettre. Idéalement, ce dernier doit être simple et peut, par exemple, faire l'objet d'une seule phrase, qui condense le message à faire passer. C'est en regard de l'efficacité du transfert de ce message que s'évaluera la maturité d'un patron abstrait.

3.2.3.2. Patron de conception et modèle générique

La maturité d'un patron de conception ou d'un modèle générique dépend de nombreux critères qui peuvent être classés selon l'utilisation opérationnel qui sera faite des patrons, ou bien du point de vue de la méthodologie employée.

Du point de vue du périmètre opérationnel, il faut déterminer des attributs spécifiques par vue. Il ne s'agit que d'un exemple, mais pour la couche fonctionnelle, il est possible d'utiliser des niveaux de maturité tels que :

- Niveau 1 : uniquement les fonctions de haut niveau, tracées sur les cas d'utilisation au niveau de la couche opérationnelle ;
- Niveau 2 : architecture fonctionnelle partielle sur plusieurs niveaux, tracée sur les exigences et modes fonctionnelles ;
- Niveau 3 : architecture fonctionnelle complète (jusqu'aux fonctions allouables), dont les fonctions feuilles sont allouées sur des composants

Cette distinction est importante car il s'agit de niveaux de maturité qui auront un impact sur les utilisateurs du modèle. Par exemple, certains métiers, consommateurs du modèle ISBM désireront le niveau 1 de maturité pour un jalon préliminaire et du niveau 3 pour un jalon de fin de développement.

D'un point de vue méthodologique, il faut réussir à donner confiance aux utilisateurs dans les patrons. Pour gagner cette confiance, il faut que les patrons soient facilement identifiables. Ainsi, la définition d'un ensemble d'attributs propre aux patrons permet d'établir leur carte d'identité (Sirin et al., 2015; Vogel-Heuser et al., 2018). Ces attributs fourniront également l'avantage de rendre les patrons autoporteur des informations qui les concernent. On peut notamment citer :

- Nom
- Alias connu
- Mots-clés
- Contexte
- Description
- Solution

- Auteurs
- Date de création/modification
- Nombre d'utilisations
- Status
 - Recommandé
 - Validé
 - Draft
 - Obsolète (pour le gestionnaire de librairie, pas dans la vue utilisateur)

Des indicateurs de maturité en lien avec le remplissage et la validation des attributs de la carte d'identité pourront ensuite servir afin de définir les niveaux de confiance et, in fine, de maturité. Un exemple de carte d'identité est donnée à la sous-section 4.2.2.2.

3.2.3.3. Modèles

Il peut être tentant d'évaluer la maturité des modèles à l'aune du nombre de modèles génériques réutilisés. Or, une évaluation de ce type ne prendrait pas en compte la nécessité d'intégrer les modèles génériques entre eux. En effet, le tout n'est pas uniquement la somme de ses parties. C'est pourquoi, la réutilisation n'est pas suffisante comme critère pour évaluer la maturité de modèles structurés à l'aide d'éléments réutilisés.

L'objectif est de fournir à l'utilisateur, des patrons qui vont le guider lors de sa modélisation. L'idée est de dépasser le simple copier-coller et de proposer des mécanismes d'instanciation ou d'indication lors de l'acte de modélisation. Cela permettra de rendre la réutilisation proactive et débouchera sur une maturité accrue. Il est en effet important que l'utilisateur puisse se poser les bonnes questions lorsqu'il modélise, et qu'il puisse être guidé dans ses choix.

3.3. Contribution méthodologique proposée

L'objectif est de fournir une méthode pour la formalisation et la réutilisation efficiente de patrons, avec comme objectif d'atteindre le niveau 3 de maturité « défini » (cf sous-section 3.1.3.4). Ces travaux proposent donc une approche permettant de répondre à ces besoins et qui consiste en trois sous-processus :

- Processus de « minage » : recherche, extraction et formalisation de patrons ;
- Processus de « maturation » : classement, amélioration de la qualité et du niveau de confiance des patrons en vue de leur réutilisation ;
- Processus d' « implémentation » : réutilisation concrète des patrons capitalisés à différents niveaux d'abstraction.

Chaque processus (respectivement minage, maturation, implémentation) peut être associé à un axe de l'échelle de maturité (respectivement capitalisation, classification en librairie, réutilisation) explicitée en section 3.1.3. Pour ces travaux, l'approche est donc nommée Minage-Maturation-Implémentation de Patrons

(MMIP). Elle est générique, et donc indépendante de l'outil (logiciel, langage ...) d'IBSM utilisé.

3.3.1. Vue de haut niveau de l'approche MMIP

L'objectif de l'approche MMIP est de faciliter la production d'un modèle système cohérent et conforme aux exigences des clients, en réutilisant le savoir-faire existant dans les modèles des projets précédents. À noter que l'application d'une démarche de capitalisation n'est pas triviale et nécessite un investissement significatif en amont. Cet effort peut souvent être difficile à concilier avec la vie d'un projet et ces multiples contraintes (échéances, coûts...), mais représente pourtant une étape importante afin de poursuivre la démarche. Afin que cette démarche de capitalisation soit efficiente, il est nécessaire que la décision d'adoption soit prise et supporté au niveau de la direction de l'organisation. D'une part, cela facilite le financement et donc le déploiement de la démarche, d'autre part, cela permet d'assurer une « standardisation » transverse à l'ensemble des projets.

Sur le diagramme d'activité de la Figure 30 (*page suivante*), la décision de capitaliser est donc représentée en amont des deux processus majeurs de l'approche MMIP. Ces deux processus ont lieu en parallèle et sont :

- « MMIP_STRAT » : ce processus définit les règles stratégiques qui seront à suivre dans le processus opérationnel.
- « MMIP_OP » : ce processus décrit les aspects opérationnels et pratiques ;

Ces processus sont complémentaires car les stratégies décidées d'un côté vont guider la démarche opérationnelle, et les actifs d'ingénierie extraits dans l'opérationnel viendront nourrir le processus stratégique sous la forme de bibliothèques afin d'être implémentées dans un outil. Ces processus sont également itératifs car après la première itération, il sera nécessaire de mettre à jour les actifs d'ingénierie mais également les stratégies de capitalisation et réutilisation afin de réajuster l'approche par rapport aux besoins des utilisateurs.

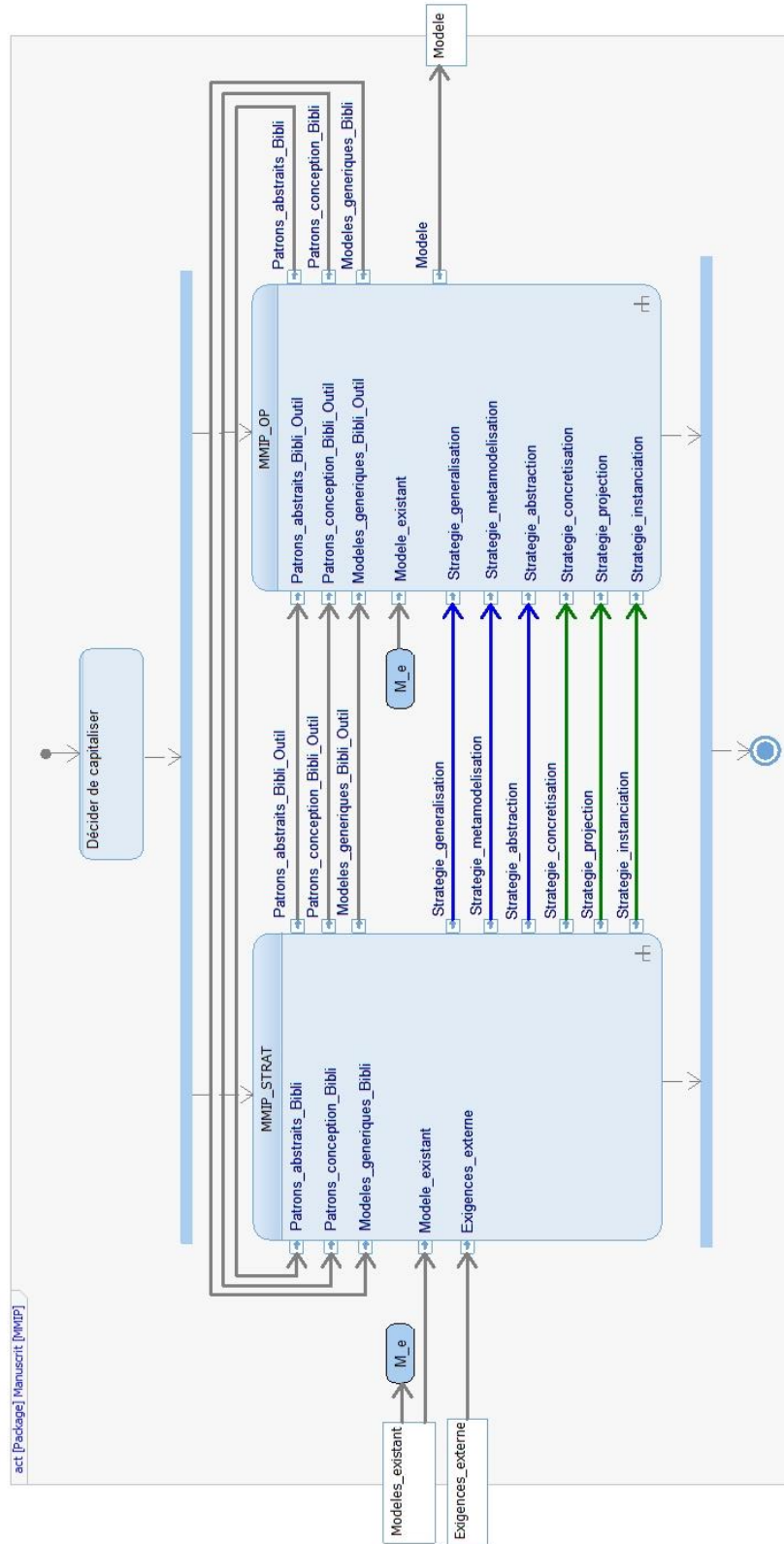


Figure 30. Vue globale de l'approche MMIP²⁴

²⁴ Ce diagramme d'activité réalisé dans le langage SysML se lit de haut en bas. Les flèches grises, bleues et vertes correspondent à des flux d'objets. Ces flux entrent ou sortent des processus (représentés par des rectangles bleus) par l'intermédiaire de ports d'entrée/sortie. Les rectangles blancs représentent des flux d'objets entrant ou sortant qui sont en relation avec des éléments à l'extérieur du périmètre de l'approche proposée. Afin de faciliter la lecture et éviter l'entrecroisement des flux, les ovales bleus permettent d'indiquer virtuellement le chemin emprunté, sans avoir à tracer l'ensemble du flux.

Chaque processus est soumis à des contraintes qui vont créer des limitations dans la réalisation des activités :

- *Contraintes outils*
 - Selon les outils, des limitations technologiques vont venir impacter les activités à réaliser.
- *Syntaxe/Sémantique du langage de modélisation*
 - Selon les langages de modélisation, certains concepts seront existants ou non, et vont donc venir contraindre la modélisation souhaitée.
- *Contraintes projet*
 - Toutes contraintes provenant des responsables de la stratégie technique en terme de coûts, délais et contraintes techniques.

Cependant, chaque processus dispose également de facilitateurs qui vont fournir des capacités pour améliorer l'efficacité des activités à réaliser :

- *Capacités outils*
 - Selon les outils, des fonctionnalités seront disponibles et permettront de faciliter ou d'ouvrir des perspectives sur les activités à réaliser.
- *Infrastructure de l'entreprise*
 - Ressources et services sur lesquels s'appuie une organisation.
- *Système de gestion des connaissances*
 - Système regroupant l'ensemble des initiatives, méthodes, techniques permettant d'identifier, d'organiser, de partager les connaissances des membres d'une organisation. L'existence d'un tel système permettra de faciliter la phase exploratoire nécessaire à l'identification des documents d'ingénierie pour la capitalisation.

Le processus stratégique sera présenté en premier, il permettra de décrire un ensemble de stratégies pour la capitalisation et la réutilisation, sur lesquelles le processus opérationnel s'appuie.

3.3.2. Processus stratégique de l'approche MMI

3.3.2.1. Objectifs

Le processus stratégique nécessite de réfléchir en amont à la capture et à l'implémentation concrète des différents niveaux d'abstraction proposés en sous-section 3.2.1 (cf Figure 31 – page suivante).

L'objectif du « processus stratégique » est de définir les règles à suivre pour l'application de la méthode dans le processus opérationnel. Sont donc définies d'une

part, les stratégies de transition entre niveaux d'abstractions pour la capitalisation et la réutilisation, et d'autre part, l'implémentation des modèles génériques et patrons dans les outils employés.

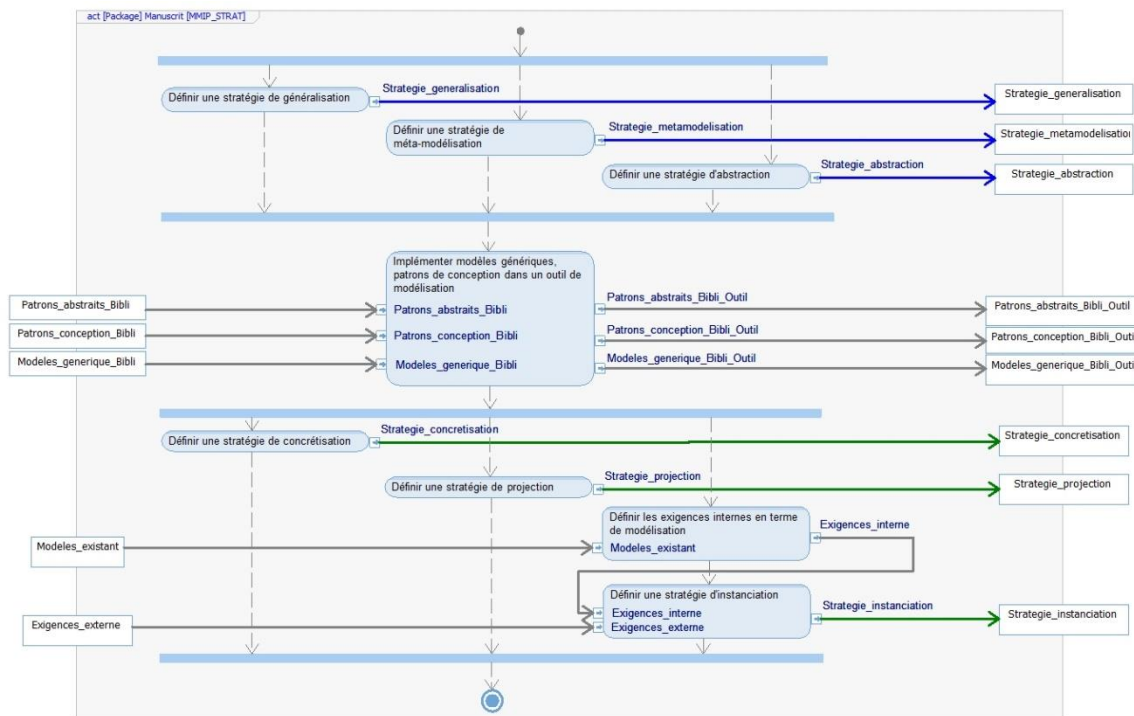


Figure 31. Vue du processus « MMIP_STRAT »

Le premier objectif est d'abord de récupérer les bibliothèques de patrons abstraits, de patrons de conception, et de modèles génériques existantes, afin de les implémenter et de les formaliser dans un outil. Si ces bibliothèques n'existent pas, que ce soit de manière formelle ou non, elles seront à construire dans le processus opérationnel (section 3.3.3).

Cette démarche permet de structurer la création des bibliothèques afin d'éviter une divergence trop forte en termes de syntaxe et de sémantique, en fournissant un référentiel unique et compréhensible par toutes les équipes d'ingénierie. Elle permet également de fournir une approche intégrée de réutilisation de savoir-faire pour les ingénieurs, en réduisant les efforts de modélisation. Ce sont donc ces bibliothèques, intégrées dans un outil, qui alimentent le processus opérationnel.

Le second objectif est dédié à la définition des transitions entre les différents niveaux d'abstraction lors de la phase d'implémentation (Figure 29). Il est nécessaire de rester cohérent à chaque niveau car le risque de divergence entre les différents utilisateurs est probable si aucune règle n'est définie. Par exemple, il est nécessaire de définir la méthode qui permet d'obtenir un modèle générique depuis un patron de conception. En effet, les concepts utilisés dans le patron de conception devront être cartographiés par rapport au concept présent dans l'outil de l'utilisateur, afin de maintenir une cohérence dans la modélisation. Une fois encore ces règles viennent alimenter le processus opérationnel.

La Figure 32 résume le processus stratégique²⁵.

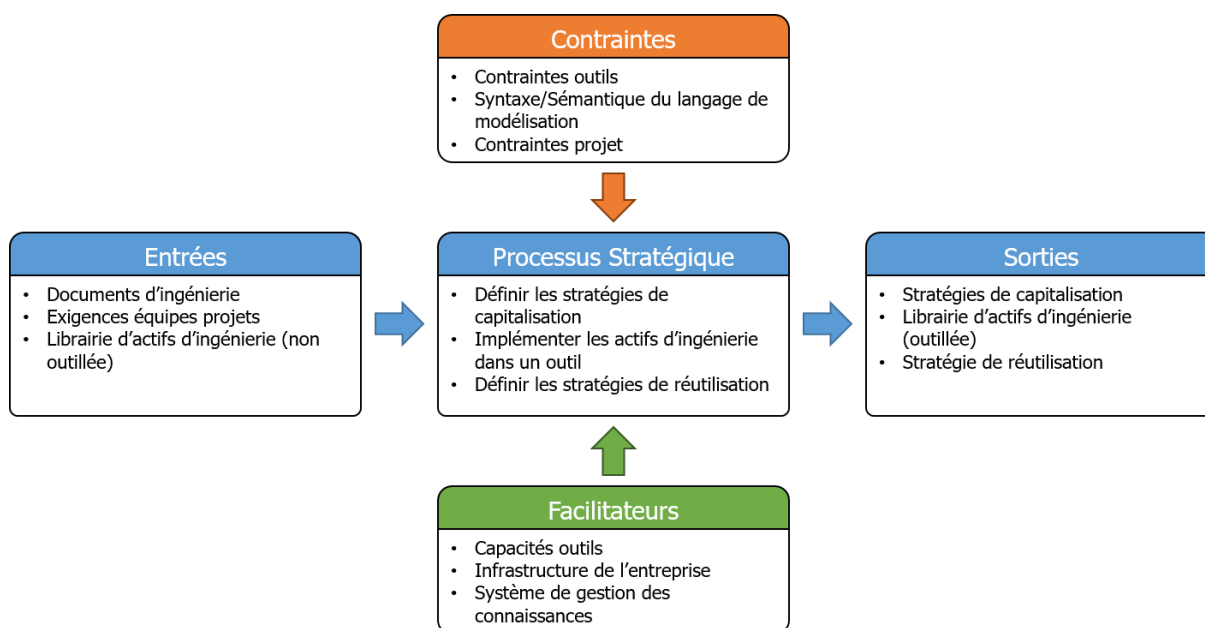


Figure 32. Description du processus stratégique

3.3.2.2. Entrées/sorties

Le processus stratégique consomme en entrée :

- *Documents d'ingénierie*
 - Ensemble de documents internes, provenant du référentiel d'ingénierie déployé, du résultat de groupes de travaux internes, ou encore de retours d'expérience.
- *Exigences équipes projets*
 - Exigences provenant des différentes équipes et qui vont contraindre les projets.
- *Librairie d'actifs d'ingénierie (non outillée)*
 - Recueil non outillé d'actifs d'ingénierie formalisés avec leurs cartes d'identité.

Le processus stratégique produit en sortie :

- *Librairie d'actifs d'ingénierie (outillée)*
 - Module outillé incluant des mécanismes permettant d'identifier et d'accéder facilement aux actifs d'ingénierie. Il est également nécessaire de prévoir des mécanismes permettant de déterminer le niveau d'applicabilité de ces actifs par rapport au projet.

²⁵ Nous avons fait le choix de présenter les sous-processus de l'approche MMIP sous une forme similaire à celle utilisée dans l'INCOSE SE Handbook (INCOSE, 2015).

- *Stratégie*
 - de capitalisation (cf sous-section 3.2.2.1)
 - de réutilisation (cf sous-section 3.2.2.2)

3.3.2.3. Activités à réaliser

Un ensemble d'activités et de tâches sont à réaliser dans le processus stratégique :

- *Définir les stratégies de capitalisation*
 - Définir les mécanismes de généralisation, de méta-modélisation et d'abstraction (cf sous-section 3.2.2.1)
 - Définir les concepts à capitaliser par rapport aux besoins/exigences/contraintes des équipes projets
- *Implémenter les actifs d'ingénierie*
 - Établir une cartographie des actifs capitalisés avec ceux disponibles dans les outils
 - Définir des bibliothèques et une organisation pour le classement des actifs d'ingénierie
 - Définir des fiches, des attributs permettant de fournir des informations sur l'actif d'ingénierie et qui permettront sa recherche (nom, problème, contexte...)
 - Définir un mécanisme de paramétrage des actifs d'ingénierie afin de faciliter les mécanismes de réutilisation
 - Créer les actifs d'ingénierie dans les bibliothèques de l'outil
- *Définir les stratégies de réutilisation*
 - Définir les mécanismes de concrétisation, de projection et d'instanciation (cf sous-section 3.2.2.2)

3.3.3. Processus Opérationnel de l'approche MMI

3.3.3.1. Objectifs

Le processus opérationnel a pour objectif de fournir un guide pour la recherche de patrons (processus « Minage »), pour la maturation de ces patrons en vue de leur réutilisation (processus « Maturation »), et finalement leur réutilisation concrète à différents niveaux d'abstraction dans le cadre d'un nouveau projet (processus « Implémentation »). Le processus complet est explicité dans la Figure 33.

Le « processus opérationnel » correspond au déploiement des règles définies dans le processus stratégique. L'objectif est donc de construire des bibliothèques d'actifs d'ingénierie, de les maintenir à jour et de les réutiliser pour modéliser un système spécifique à un projet.

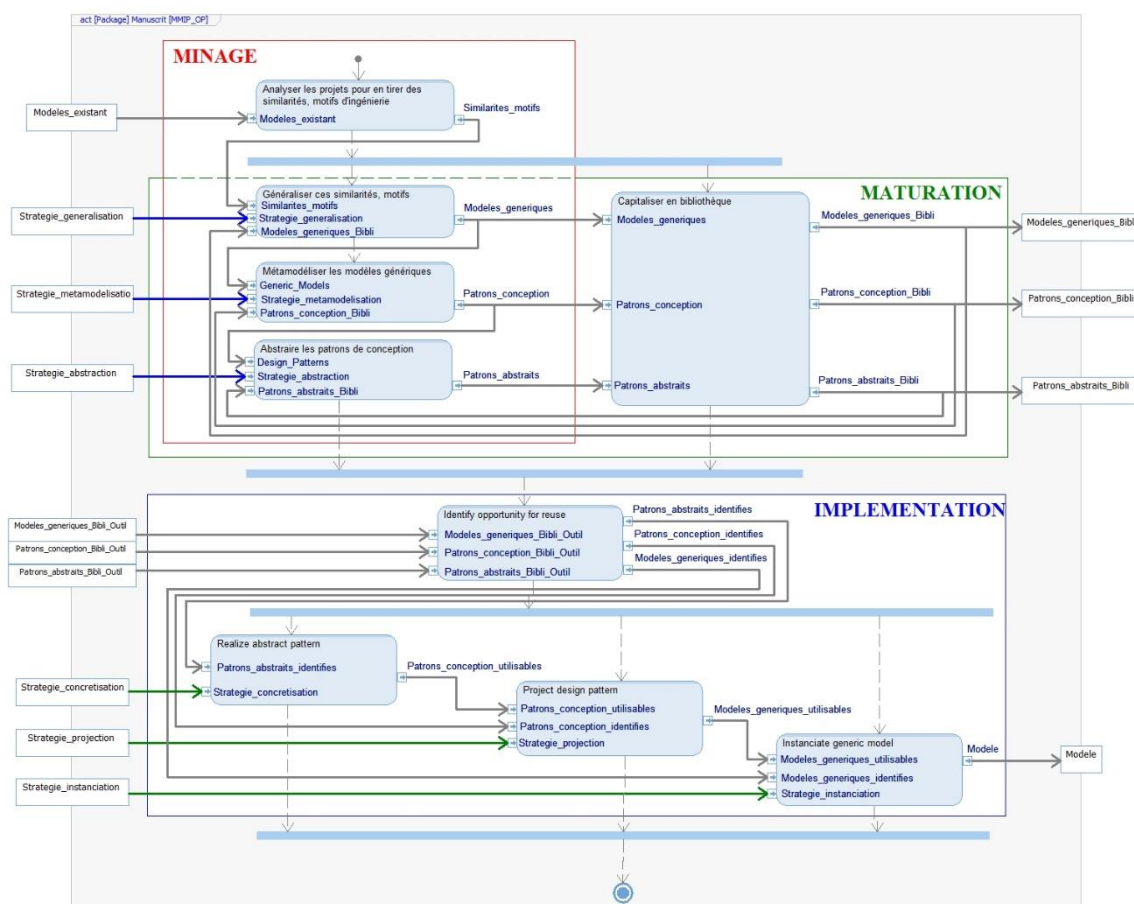


Figure 33. Vue du processus « MMIP_OP »

3.3.3.2. Entrées/sorties

Le processus opérationnel consomme en entrée :

- Documents d'ingénierie
- Librairie d'actifs d'ingénierie (outillée)
- Stratégie de capitalisation et réutilisation

Le processus opérationnel produit en sortie :

- Librairie d'actifs d'ingénierie (non outillée)
- Modèles pour le projet

3.3.3.3. Activités à réaliser

Un ensemble d'activités et de tâches sont à réaliser dans le processus opérationnel :

- Identifier des similarités/motifs d'ingénierie
 - Identifier les documents, modèles d'ingénierie à analyser
 - Analyser les documents et modèles

- Faire valider et vérifier ces similarités/motifs par des experts
- *Réaliser la démarche de capitalisation*
 - Déterminer le niveau de capitalisation nécessaire à atteindre
 - Développer des actifs d'ingénierie en suivant le processus de « minage »
- *Formaliser les actifs d'ingénierie*
 - Établir la carte d'identité des actifs d'ingénierie
 - Classer les actifs en librairie
- *Définir des catégories pour la librairie*
- *Réutiliser les actifs d'ingénierie dans les outils*
 - Identifier des opportunités de réutilisation
 - Modéliser le système à faire

Ces activités sont réparties en 3 sous-processus : minage, maturation et implémentation. Lors d'une première itération, il sera nécessaire de réaliser en premier lieu le sous-processus opérationnel « minage », puis « maturation », puis « implémentation ». Cependant, une fois qu'une librairie d'actifs est définie, certains sous-processus ne seront pas à refaire.

La Figure 34 résume le processus opérationnel.

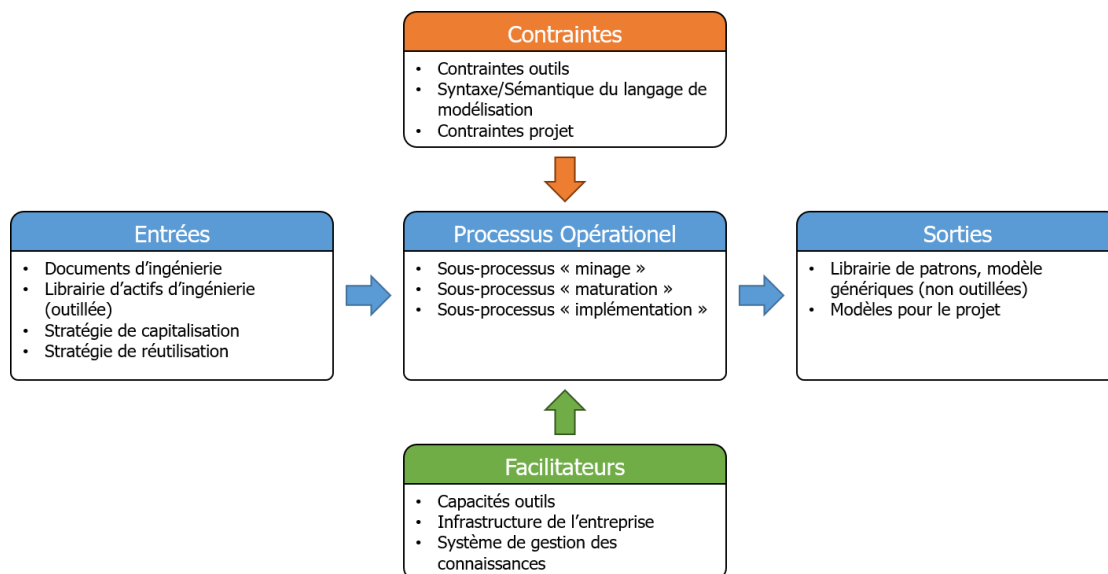


Figure 34. Description du processus opérationnel

3.3.3.4. Description des sous-processus

Capitalisation

a) Minage

Le point de départ est le niveau « Modèle », en bas de la pyramide (cf Figure 23), car le processus de minage requiert d'effectuer une analyse des documents et des modèles des projets précédents, ainsi que l'étude continue des projets en cours. Cette démarche support du processus de capitalisation rend possible le minage du savoir-faire en identifiant, en repérant et en isolant des similarités d'IS qui sont utilisées à divers endroits dans le même projet ou de la même façon dans des projets différents. Cela permet de créer des modèles dont le niveau d'abstraction est plus élevé, les modèles génériques. Dans ce sens, il convient de se demander quelles sont les propriétés des actifs d'ingénierie à sauvegarder en librairie. Il est possible d'imaginer que pour les fonctions, des éléments spécifiques seront à sauvegarder tels que : nom, sous-fonction, entrées/sorties, attributs, ...

Ces modèles génériques peuvent être ensuite méta-modélisés en patrons de conception, qui peuvent ensuite être abstraits en patrons abstraits au besoin. À partir du niveau « Modèle Générique », tous les modèles produits par le processus de minage sont utilisés dans le processus « Maturation ».

La Figure 35 résume le processus opérationnel « minage ».

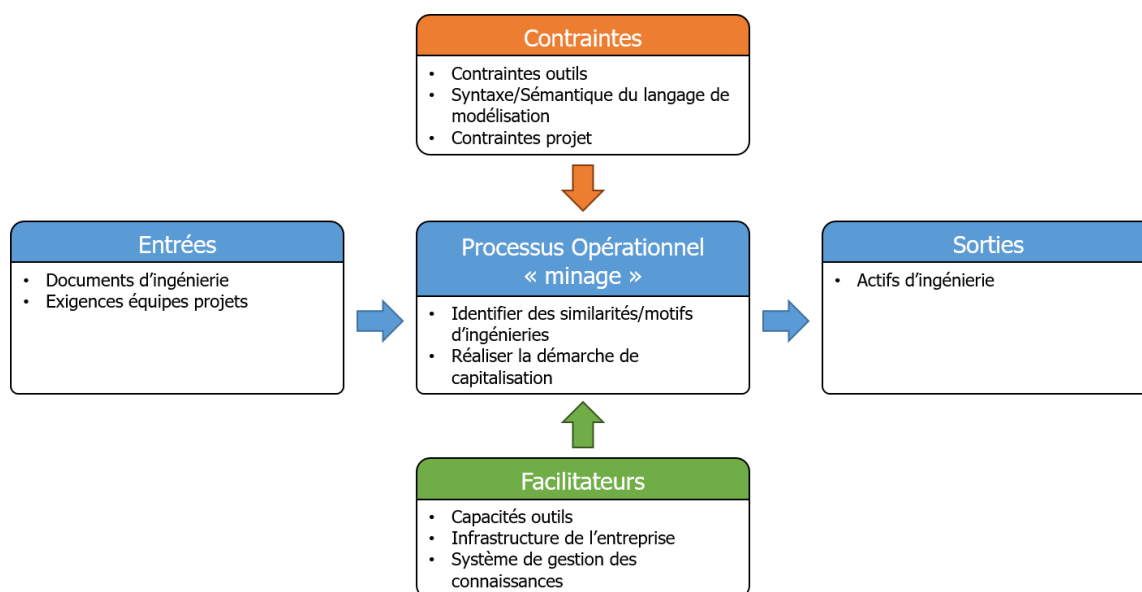


Figure 35. Description du processus opérationnel « minage »

b) Maturation

La « Maturation » est cruciale au sein de l'approche méthodologique car elle impacte très fortement l'« Implementation ». Il est nécessaire d'évaluer les différents modèles et patrons identifiés dans le processus « Minage », afin de s'assurer que leur niveau de maturité (ou « niveaux de confiance ») soit suffisant. En effet, ils doivent, d'une part, être suffisamment représentatifs du savoir-faire capitalisé afin d'avoir de la

valeur ajoutée pour la réutilisation, et, d'autre part, ils doivent apparaître suffisamment matures afin que les utilisateurs aient confiance en leur utilisation.

Pour améliorer le taux d'utilisation des actifs d'ingénierie, il est nécessaire de les classer en librairie. L'objectif premier est de rendre disponible tout le savoir-faire capitalisé aux utilisateurs. Cependant, sans indication et sans classement, la navigation est trop difficile, l'objectif de chaque modèle pas assez clair. Ainsi, il est important de classer ç l'aide d'une carte d'identité chaque modèle et patron afin de fournir des clés de lecture et de compréhension à l'utilisateur, tout en facilitant leur recherche, leur mise à jour et leur réutilisation.

Il est intéressant en ce sens de réfléchir à la caractérisation des modèles afin de faciliter leur classement. Comme proposé dans les travaux de (Sirin et al., 2015), il est possible de définir des fiches d'identités spécifiques pour l'IS (cf sous-section 3.2.3.2). Pour les fonctions il est possible de définir un certain nombre de champs tels que : nom, mots-clés, contexte, description, solution, auteurs, date (création, dernière modification), status (validé, en cours, recommandé, obsolète...)

Ces librairies sont ensuite utilisées dans le processus « MMIP_STRAT » décrit précédemment à la section 3.3.2.

La Figure 36 résume le processus opérationnel « maturation ».

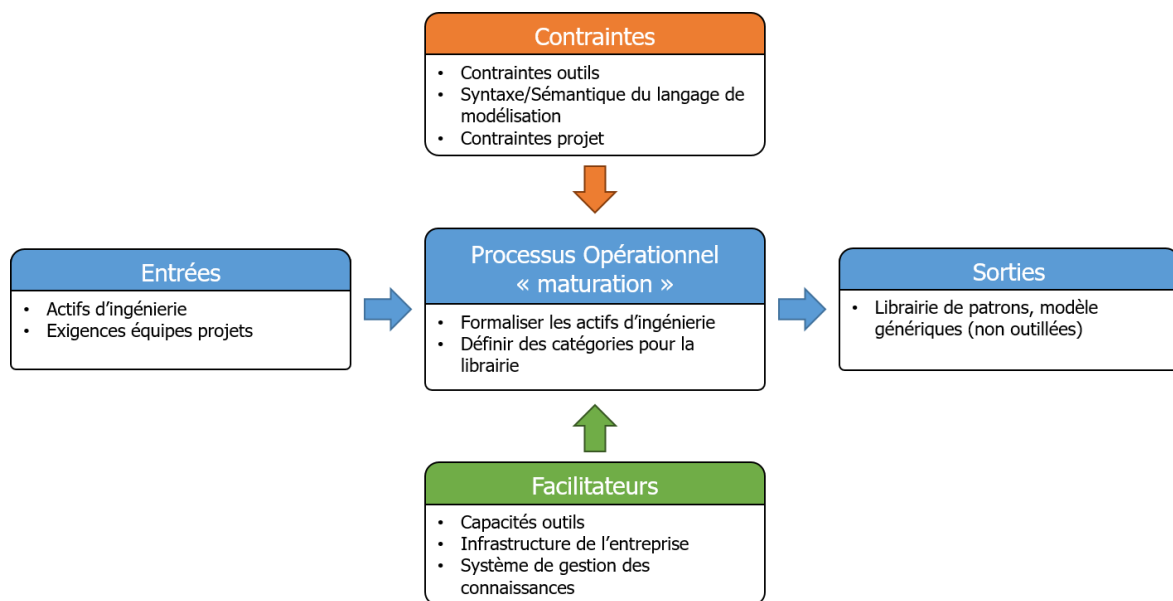


Figure 36. Description du processus opérationnel « maturation »

Réutilisation

c) Implémentation

Ce processus s'intéresse à la redescende en abstraction du savoir-faire. L'objectif du processus est double puisqu'il permet de répondre à une opportunité de réutilisation, mais il permet également de venir en support du processus de modélisation d'une manière proactive, en guidant l'utilisateur dans sa modélisation. Les stratégies identifiées dans le processus « MMIP_STRAT » permettent la

concrétisation de patrons abstraits, la projection de patrons de conception ou encore l'instanciation de modèles génériques afin de modéliser un système particulier.

Ce processus doit laisser une part active à l'utilisateur, car en fonction des exigences du projet, il pourra intégrer ou non certains éléments réutilisables dans son modèle. Pour cela, il est nécessaire de laisser la possibilité aux utilisateurs de modifier leurs modèles, en fonction des regroupements, et des choix d'architecture opérationnel, fonctionnel, logique et organique souhaités.

La Figure 37 résume le processus opérationnel « maturation ».

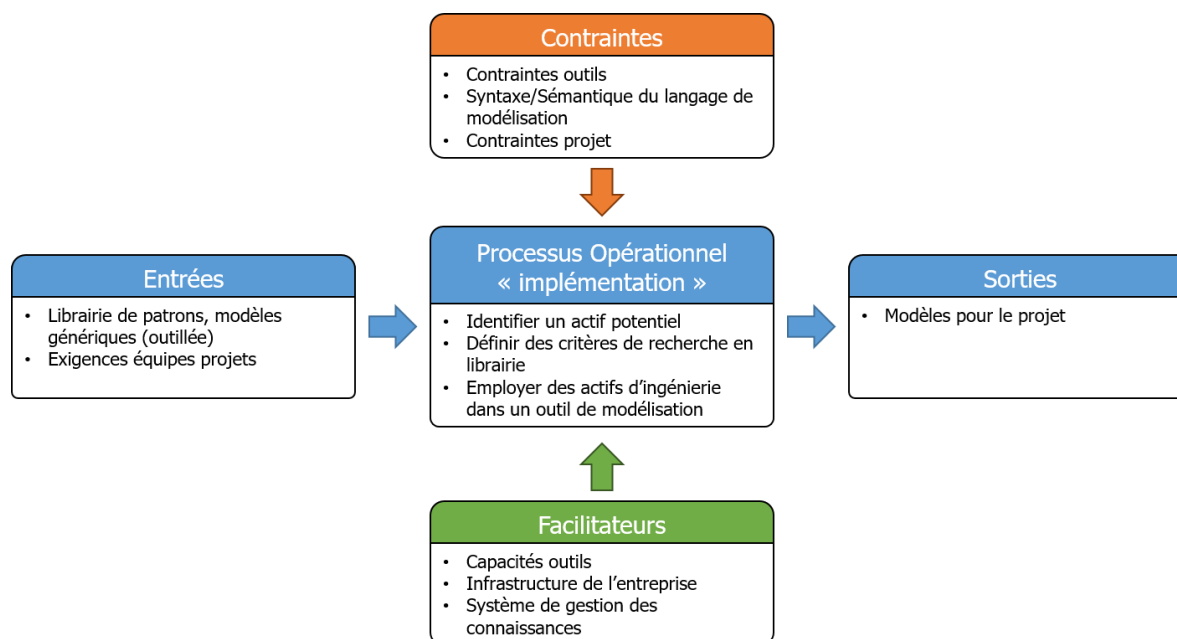


Figure 37. Description du processus opérationnel « implémentation »

Les deux processus de l'approche MMIP viennent d'être présentés et un exemple qui s'appuiera sur cette approche est proposé dans le Chapitre 4 à la section 4.2. Toutefois, il nous apparaît d'abord nécessaire de compléter la justification quand à la décision de capitaliser le savoir-faire. La sous-section suivante insiste donc sur les raisons qui ont poussé à cette décision dans le cadre de la thèse, à la lumière des éléments décrits dans ce chapitre.

3.4. Décision de capitaliser

L'objectif de cette section est d'exposer et compléter les raisons qui peuvent pousser une entreprise industrielle, comme l'est SEP, à vouloir capitaliser son savoir-faire (Figure 30), notamment sous la forme de patrons.

3.4.1. Accompagner la transition vers l'ISBM

Dans le domaine aéronautique, les systèmes de distribution d'énergie électrique ont connu des évolutions de conception qui ont entraîné une augmentation significative de la complexité de ces systèmes, de telle sorte qu'il devient difficile pour une personne de comprendre l'ensemble du système. Or comme explicité en section 1.3, dans un environnement commercial très concurrentiel, SEP doit se doter des

dernières innovations méthodologiques pour améliorer ses performances opérationnelles. De ce fait, l'ISBM est apparue comme une bonne candidate à l'évolution des pratiques d'ingénierie.

Cependant, l'évolution des pratiques d'ingénierie nécessite également un accompagnement méthodologique (section 1.3.2). La thèse développée dans ce manuscrit est de tirer parti des actifs d'ingénierie existants ou à capitaliser pour faciliter l'appropriation de l'ISBM par les ingénieurs, et in fine, accélérer le développement de modèles. Il s'agit de l'une des premières raisons qui ont poussé à la décision de capitaliser.

3.4.2. Un potentiel de réutilisation...

La décision de capitaliser n'a pas eu pour seule origine le besoin d'accompagnement aux changements. En effet, cette décision est également partie du constat que les missions, fonctions principales et composants des systèmes de distribution électrique étaient relativement similaires d'un projet à l'autre.

Des travaux réalisés en interne ont donc permis de montrer que des éléments similaires étaient en réalité génériques et pouvaient être réutilisés. C'est le cas notamment concernant la vision fonctionnelle du système de distribution. Un des chantiers menés en entreprise au cours des travaux de thèse visait à la réalisation d'une décomposition fonctionnelle générique d'un cœur électrique (indépendamment d'un constructeur ou d'un modèle avion). En analysant les décompositions de différents systèmes, il a été démontré que des fonctions et leurs sous-fonctions étaient identiques ou similaires. Elles étaient au même niveau hiérarchique. Une étude plus poussée a permis de déterminer qu'elles étaient également situées à des positions similaires dans des enchaînements fonctionnels. Il est apparu qu'en plus d'être similaires entre les différents systèmes, certaines fonctions étaient également répétées au sein du même système.

Il a donc été permis de formaliser une décomposition fonctionnelle générique à partir des décompositions fonctionnelles étudiées. Le travail a notamment consisté à factoriser des fonctions similaires (Figure 38).



Figure 38. Exemple d'une fonction répétée (à gauche) et de sa factorisation (à droite)

En effet, à partir d'une décomposition fonctionnelle composée de plus de 700 fonctions²⁶, il a été possible de la réduire par factorisation à 120 fonctions²⁷. Cette première étude montrait donc que le ratio moyen de réutilisation de fonctions était de 6. Il apparaissait donc pertinent de fournir un cadre méthodologique pour la capitalisation.

3.4.3. ... assez peu exploité

Le potentiel de réutilisation était donc présent, cependant, il s'est avéré que le savoir-faire disponible n'était pas suffisamment formalisé mais plutôt disséminé à travers de nombreux documents et modèles. Cet état de fait rendait donc la réutilisation plus difficile à mettre en œuvre sur le long terme.

En se basant sur l'échelle de maturité proposée en section 3.1.3 . Il s'avère que le niveau de maturité lors du lancement de la thèse était plus proche du niveau 2. En effet, une volonté collective et des objectifs communs ont permis la mise en place de groupes de travaux pour l'identification d'actifs d'ingénierie. Cependant, les résultats de ces chantiers n'ont pas pu encore être formalisés en bibliothèque structurée et n'ont donc pas encore permis de réutilisation efficiente.

Ainsi, la proposition de niveaux de maturité a permis l'évaluation de la situation. Cela a fourni des renseignements sur les efforts à fournir pour augmenter en maturité. De ce fait, l'objectif est d'améliorer le niveau actuel de maturité, en fournissant un cadre méthodologique pour la valorisation d'actifs d'ingénierie et ainsi atteindre le niveau 3 sur l'échelle proposée.

²⁶ Tous niveaux hiérarchiques confondus

²⁷ idem

Conclusion

Ce chapitre a permis de poser des métriques et concepts préalables à la valorisation d'actifs d'ingénierie. D'une part, une échelle de maturité pour l'évaluation des processus de réutilisation a été proposée afin de fournir la capacité à évaluer le niveau de maturité de l'application d'un processus de réutilisation. Celui-ci est en réalité décomposé en 3 sous-axes qui présentent chacun des caractéristiques entrant dans la détermination du niveau de maturité globale. Cette évaluation est nécessaire afin de déterminer les points faibles de la démarche et de cibler les efforts à fournir pour améliorer le niveau de maturité en regard de l'objectif visé.

Dans le contexte industriel de la thèse, le niveau visé dans un premier temps étant le niveau 3, une contribution méthodologique a été proposée et vise à faciliter et promouvoir la réutilisation de modèles en s'appuyant sur le concept de patron. Des niveaux d'abstraction ont donc été définis afin de situer le concept de patron par rapport aux modèles. Cette hiérarchisation a permis de spécifier les objets manipulés, de définir les transitions de passage entre chaque niveau, ainsi que les rôles et responsabilités des ingénieurs. Cette proposition méthodologique vise à faciliter l'assimilation des nouvelles approches d'ingénieries induites par l'ISBM auprès des ingénieurs.

Les conditions préalables au déploiement de l'approche MMIP ont également été exposés. Le contexte des travaux et de SEP ont permis de montrer que ces conditions sont remplies. Le chapitre suivant va donc décrire et évaluer le déploiement de cette approche sur un exemple.

Chapitre 4.

Mise en œuvre de l'approche méthodologique et analyse

Sommaire du chapitre

4.1. Particularités SAFRAN du contexte de l'étude	109
4.1.1. Cadre SAFRAN d'architecture et de modélisation	109
4.1.2. Système étudié (système à faire).....	114
4.2. Application de la méthodologie.....	116
4.2.1. Processus stratégique.....	116
4.2.2. Processus opérationnel.....	123
4.3. Synthèse et évaluation	144
4.3.1. Maturité du processus de réutilisation	144
4.3.2. Retour d'expérience sur l'adoption de l'IBSM.....	146

Introduction

Le chapitre précédent a permis de définir les éléments nécessaires au déploiement de l'approche méthodologique MMIP. L'objectif de ce chapitre est donc d'illustrer la mise en application de cette approche dans un cadre Safran.

En ce sens, bien que l'approche soit agnostique du système à faire, il est nécessaire de l'accorder avec les spécificités d'une organisation. Le contexte Safran est donc détaillé afin de justifier la spécificité de la démarche suivie (section 4.1). Le cas d'application est ensuite déployé sur un système de distribution électrique d'aéronefs (section 4.2) avec un focus sur la couche fonctionnelle. L'analyse de l'impact de l'utilisation de patrons pour la capitalisation/réutilisation de savoir-faire et sur l'adoption de l'ISBM est discuté dans la dernière section de ce chapitre (section 4.3).

4.1. Particularités SAFRAN du contexte de l'étude

4.1.1. Cadre SAFRAN d'architecture et de modélisation

4.1.1.1. Contexte Safran

De par le contexte industriel de la thèse, les différents cas d'étude présentés seront alignés avec le cadre d'architecture choisi par le groupe Safran. En effet, il existe, en interne à la société Safran, un guide méthodologique nommé ONE Safran dont l'objectif est de guider les développements. À l'intérieur de ce guide, l'IS est présente sous la forme de 14 processus, qui permettent de développer un système depuis la capture des besoins clients jusqu'à validation et la vérification, en passant de manière classique par la modélisation de l'architecture opérationnelle, fonctionnelle et organique, de la validation et de la vérification,...

Pour structurer ce guide méthodologique, Safran s'appuie sur le cadre d'architecture CESAM (*CESAMES Systems Architecting Method*) développé par CESAMES²⁸. L'une des vues proposées permet de visualiser l'architecture du système sous la forme d'une matrice (Figure 39). Un premier axe de classification correspond à la décomposition en trois visions architecturales (opérationnelle, fonctionnelle, constructionnelle) d'un système. À cet axe vertical est couplé un axe horizontal qui correspond aux « comportements », c'est-à-dire, les propriétés attendues (besoins, exigences), ainsi que les descriptions des états, des éléments statiques, de la dynamique et des objets (flux).

La colonne décrivant les objets n'étant qu'une synthèse des autres, elle ne sera pas utilisée dans ces travaux. Dans ce chapitre, les différents cas d'études s'appuieront sur les différentes cases de la matrice pour illustrer les actifs d'IS à capitaliser et à modéliser.

Dans ce manuscrit, les différentes définitions considérées pour les différents artefacts de modélisation sont donnés dans le Chapitre 1 section 1.2.4.

²⁸ Center of Excellence on Systems Architecture, Management, Economy and Strategy (<http://www.cesames.net/en/home-2/>)

Architectural visions	Expected features	States	Static elements	Dynamic behaviors	Objects
Operational vision	Needs	Operational contexts	Missions & uses and operational interdependencies	Operational scenarios	Operational objects
Functional vision	Functional requirements	Functioning modes	Functional decomposition and functional interactions	Functioning	Functional objects
Constructional vision	Constructional requirements	Technical configurations	Constructional decomposition and constructional interactions	Constructional functioning	Concrete objects

Figure 39. Matrice structurant le cadre d'architecture CESAM (Krob, 2017)

4.1.1.2. Avantages et inconvénients pour la capitalisation et la réutilisation

L'avantage de raisonner à l'aide d'un cadre d'architecture matriciel est de fournir différents « points d'entrées » au travail de modélisation. Ainsi, en fonction des données d'entrées ou des pratiques de l'ingénieur, cela fournit une manière flexible de travailler puisqu'il est possible de démarrer l'analyse système à différents endroits. Chaque « point d'entrée » représente un certain type d'artefacts, mais pas seulement. En effet, chaque artefact dispose d'un certain nombre de propriétés, ainsi qu'un ensemble de liens de traçabilité avec les autres artefacts de modélisation. Ces liens peuvent être de même niveau système, mais également entre les niveaux système et sous-systèmes. L'environnement de développement introduit donc la notion de Système de Systèmes (*System of Systems*). Ainsi, la vision globale d'un système peut donc être représentée en trois dimensions (Figure 40). Sur l'axe « *Systemic hierarchy* », chaque niveau est un système dans lequel la grille s'applique (« *Architectural visions* » et « *Behaviors* »).

Ce nombre important de « points d'entrée » peut aussi être un inconvénient, dans la mesure où la multiplicité de liens de traçabilité entre les artefacts est extrêmement compliquée à gérer et à garder en cohérence. Cela vient du fait que le cadre donne des vues d'un modèle et que ces vues doivent rester cohérentes entre elles. Ainsi, même en supprimant la colonne « objets », il reste douze « vues », chacune disposant de propriétés spécifiques et surtout des liens de traçabilité multiples. Ce sont autant de « points d'entrées » pour la capitalisation. Autrement dit, la capitalisation d'une seule de ces douze vues, sans prise en compte du reste de la grille, va générer des problèmes lors de la réutilisation. Il apparaît ainsi difficile de rendre indépendant la capitalisation et la réutilisation de chacune de ces vues tout en conservant une cohérence globale.

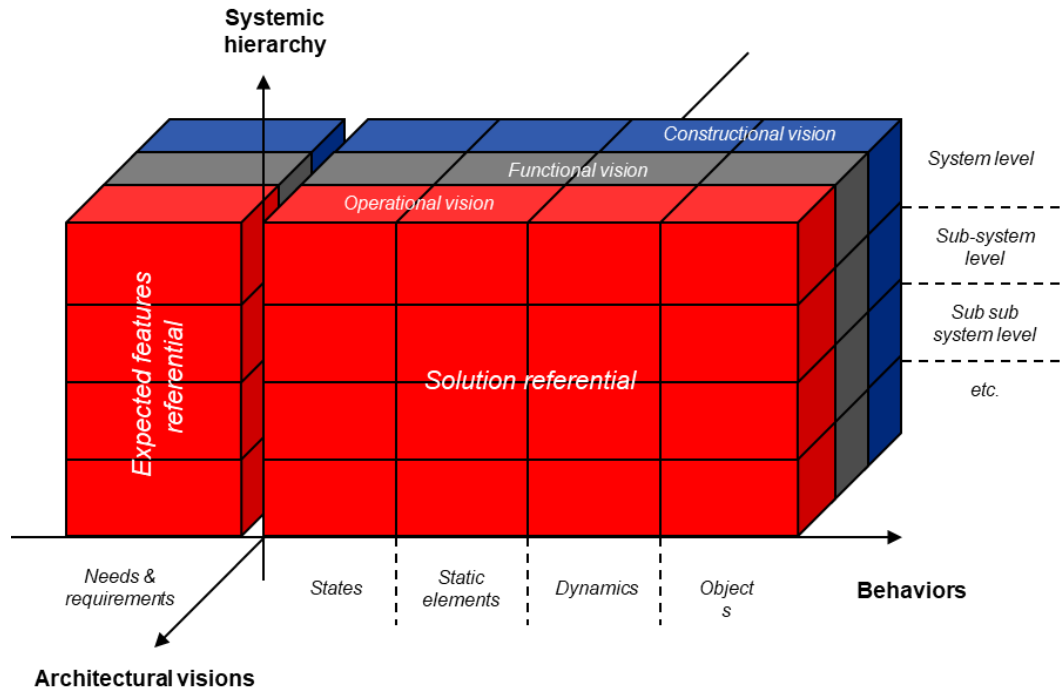


Figure 40. Cube d'analyse système, adapté de CESAM (Krob, 2017)

Dans ces travaux, certaines vues ne seront donc pas capitalisées au sens de l'approche MMIP et une justification sera donnée en sous-section suivante. Cependant, l'objectif est de fournir une réutilisation ciblée de certains objets de modélisation, avec des liens de dépendance entre eux, afin de réduire la complexité de la gestion de la cohérence.

4.1.1.3. Démarche suivie pour les cas d'études

En se basant sur la grille CESAM, la réduction de certains degrés de liberté (au sens du nombre de cases indépendamment capitalisées et réutilisées) va permettre de réduire la complexité sans affecter les capacités de réutilisation du savoir-faire.

Dans le cas d'un cœur électrique, à la suite d'entretiens réalisés avec les acteurs internes du développement de ce système²⁹, il est ressorti que les parties prenantes s'accordent sur l'existence d'un noyau commun de concepts d'architecture et de bonnes pratiques. Cependant, il est également ressorti que ces éléments communs n'étaient pas suffisamment formalisés. En effet, les ingénieurs experts disposent de l'ensemble des informations et du savoir-faire nécessaire « dans leur tête » afin de réaliser leur travail. À l'inverse, pour les ingénieurs juniors, ces informations sont éparpillées dans les divers documents de chaque projet. Or, dans le contexte de transformation interne de l'entreprise (évoqué en sous-section 1.3.1.1), d'un métier d'équipementier vers un métier de systèmeur, il est nécessaire de formaliser un ensemble d'artefacts d'IS afin de disposer de documents uniformisés pour la réalisation d'analyses d'impact, ou pour la communication entre les diverses équipes.

Dans notre cas, ce noyau commun se focalisera sur la colonne « éléments statiques » de la grille CESAM, et va constituer le point de départ pour la capitalisation.

²⁹ équipes programme, câblage, validation, vérification, simulation, qualité, architecte et ingénieur système, suivi série,...

L'intérêt principal est de fournir un nombre réduit de « points d'entrées » pour modéliser le système, dont l'ensemble des parties prenantes du développement s'accorde sur leurs valeurs ajoutées.

La démarche a donc été de se concentrer d'abord sur ces trois aspects, et d'analyser ensuite comment « accrocher » le reste des artefacts de modélisation. Il s'avère que dans l'approche système préconisée par l'ISBM, l'un des objectifs est d'obtenir une traçabilité complète des différents éléments à la fois de manière horizontale (entre les éléments d'une même vision système) et verticale (entre les éléments de différentes visions système), par exemple :

- pour la traçabilité **horizontale** :
 - les cas d'utilisation sont réalisés dans une ou plusieurs phases du cycle de vie ;
 - chaque partie prenante externe souhaite que le système réalise un ou plusieurs cas d'utilisation ;
 - un scénario opérationnel permet de décrire une séquence de la dynamique des flux échangés entre le système et son environnement pour un cas d'utilisation donné.
- pour la traçabilité **verticale** :
 - les cas d'utilisations sont réalisés par une ou plusieurs fonctions ;
 - les fonctions terminales sont réalisées par un ou plusieurs composants (logiques ou physiques) ;
 - une configuration technique est un ensemble fixé de composants du système qui correspond à un ou plusieurs modes de fonctionnement.

Il faut retenir que pour chaque case de la grille CESAM, la traçabilité doit s'effectuer en croix : traçabilité avec tous les cases qui sont sur la même ligne, traçabilité avec les cases au-dessus et en dessous (si c'est possible). De ce fait, les travaux présentés dans ce manuscrit préconisent de fournir une traçabilité plutôt horizontale aux utilisateurs et de les laisser se charger manuellement de la traçabilité verticale. L'objectif est de fournir une réutilisation cohérente par « étage ». Sur une même vision du système, l'ensemble des éléments est cohérent afin de fournir un guide clair de modélisation. Chaque niveau étant cohérent, la traçabilité verticale fournit donc à l'utilisateur la capacité de vérifier ses choix de conception. Ceci apporte un avantage substantiel pour réduire le nombre d'itérations et accélérer la conception.

Nos travaux proposent donc de s'appuyer sur les cas d'utilisation, les fonctions et les composants comme pivots de la capitalisation et de la réutilisation. Ainsi, l'application de l'approche MMIP fournira :

- Pour la **vision opérationnelle** : une librairie de cas d'utilisation pour répondre aux besoins. Ces cas d'utilisation seront associés à des contextes (phases du cycle de vie) et donc à des parties prenantes. Les scénarios

opérationnels ne seront pas fournis car ils sont souvent une expression du besoin client (et donc un modèle d'entrée). Les liens vers certaines fonctions système pourront être indiqués mais ne seront pas modélisés.

- Pour la **vision fonctionnelle** : une librairie de fonctions pour réaliser les cas d'utilisation. Ces fonctions seront associées à des exigences et à des modes. Les scénarios fonctionnels ne seront pas fournis car ils vont découler des scénarios opérationnels. Les liens vers certains organes (logiques ou physiques) pourront être indiqués mais ne seront pas modélisés.
- Pour la **vision organique** : une librairie d'organes (physiques ou logiques) pour réaliser les fonctions. Ces organes seront associés à des exigences et à des configurations. Les scénarios organiques ne seront pas fournis car ils vont découler des scénarios fonctionnels.

Un aperçu de la démarche est résumé dans la Figure 41. En vert, des données externes obligatoires sont fournies par le client. C'est le cas du « besoin client » par exemple, qui permettra à l'ingénieur d'induire des cas d'utilisation qui seront en librairie. De même, les scénarios opérationnels seront modélisés au fur et à mesure de l'analyse opérationnelle, afin de préciser des besoins clients. Dans les encadrés bleus figure l'ensemble des éléments en bibliothèque. Pour chaque ligne, les éléments sont rattachés soit à des cas d'utilisations, soit à des fonctions, soit à des organes.

Architectural visions	Expected features	States	Static elements	Dynamic behaviors
<i>Operational vision</i>	Needs	Operational contexts	Missions & uses and operational interdependencies	Operational scenarios
<i>Functional vision</i>	Functional requirements	Functioning modes	Functional decomposition and functional interactions	Functioning
<i>Constructional vision</i>	Constructional requirements	Technical configurations	Constructional decomposition and constructional interactions	Constructional functioning

Figure 41. Artefacts capitalisés (en bleu), hors périmètre de réutilisation (en orange)

Cette démarche peut également être illustrée via un métamodèle (Figure 42). L'objectif est de définir explicitement les concepts qui seront manipulés. Cela permet de guider la capitalisation et les mécanismes d'implémentation.

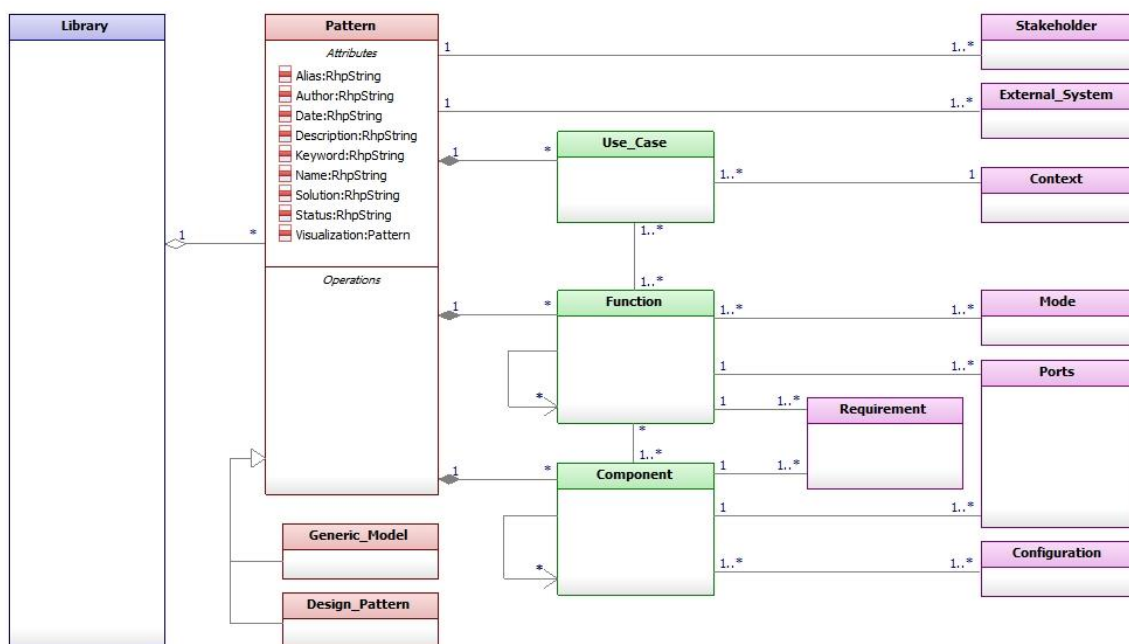


Figure 42. Métamodèle des concepts en librairie

Cette formalisation permet également d'expliciter et de mettre à disposition le concept de ports aux niveaux fonctionnels et organiques. Ce concept provenant du langage SysML n'est pas fourni par la grille CESAM. Cette notion peut se révéler très intéressante dans le cas où l'on souhaite s'appuyer sur la notion de multiplicité (indication du nombre d'instances de bloc mis en jeu). En effet, via cette dernière, les ports apportent une aide pertinente pour guider l'ingénieur lors de la conception. Par exemple, dans le cas d'une fonction identifiés comme un patron, le nombre de ports d'entrées et de sorties de cette fonction seront peu ou prou les mêmes à chaque réutilisation. Ainsi, la notion de port permet de sauvegarder des informations utiles pour une réutilisation future. Prenons le cas d'une fonction qui dispose d'un seul et unique port d'entrée associé à un flux électrique (par exemple en haute puissance). L'indication d'une multiplicité de 1 sur ce port fournira un guide lors de la réutilisation. En effet, si la multiplicité est de 1, il ne pourra pas y avoir d'autre port d'entrée associé à un flux électrique haute puissance. Si l'ingénieur souhaite le supprimer ou en rajouter, il devra nécessairement justifier les raisons de ce choix.

Maintenant que le contexte particulier à Safran a été présenté, et que les contraintes particulières liées à ce contexte ont été mises en avant, la section suivante va présenter les caractéristiques du système étudié ainsi que l'approche d'ingénierie actuellement en cours de mise place.

4.1.2. Système étudié (système à faire)

4.1.2.1. Caractéristiques du système

Les systèmes à développer dans le cadre d'un projet peuvent correspondre soit à des produits complètement nouveaux, soit à des dérivés de produits existants. Comme expliqué en sous-section 1.1.1, SEP conçoit et développe des équipements et systèmes, destinés à l'aéronautique, dans les domaines de la gestion de la puissance électrique (conversion, distribution, protection).

Dans la sous-section suivante, l'objectif est de présenter une partie de l'ingénierie documentaire actuellement mise en place afin d'explicitier les documents d'ingénierie qui vont composer l'une des bases de travail pour la création de patrons. Il faut noter que certains documents utilisent des modèles et qu'il s'agit donc uniquement d'effectuer une transformation d'un mode de représentation (par exemple Microsoft Visio) vers le formalisme d'ISBM souhaité.

4.1.2.2. Développement du système

Dans le cadre de l'ingénierie centrée sur les documents, un certain nombre de documents est produit lors de la conception d'un système. Ces documents sont organisés et hiérarchisés dans un référentiel documentaire. Dans le cas de Safran Electrical & Power, ces documents permettent de spécifier et décrire le système ou encore de justifier les choix de conception. Chaque document de spécification consiste en un ensemble d'exigences correspondant au périmètre spécifié. Des règles pour la définition de ces spécifications sont établies et sont les mêmes pour chaque projet. Cela permet de faciliter leur lecture et leur analyse par des outils de gestion d'exigences. Évidemment, en fonction de la nature du projet, et surtout des exigences contractuelles émanant du client, certains aménagements peuvent être réalisés.

L'objectif de la création d'un ensemble documentaire comme référentiel d'ingénierie inclut divers objectifs :

- Montrer la conformité des développements menés à SEP avec les objectifs de SEP ;
- Montrer la conformité des développements avec les standards aéronautiques ;
- Obtenir des produits à coût optimisé pour les clients de SEP ;
- Améliorer la compétitivité de SEP ;
- Faciliter une communication claire et non ambiguë entre les acteurs participant au développement d'un produit ;
- Construire un Corpus des Connaissances des technologies développées à SEP.

Le référentiel de l'ingénierie est développé de manière coopérative au sein de la direction technique de SEP. L'ensemble de la documentation du référentiel est un groupe de standards et de procédures de SEP dédié au développement des projets. Il comprend un jeu complet de documents sur les aspects essentiels (voir paragraphe suivant) assurant le succès des projets et programmes aéronautiques.

Le développement d'un système est découpé en phases, délimitées par des jalons (et leurs revues associées). Durant chaque phase, des activités sont exécutées afin d'atteindre l'objectif de la phase, préalablement déterminé. À chaque activité sont associés un ou plusieurs documents, données de sortie et preuves que la tâche en question a bien été effectuée. La vue complète de la gestion de programmes et de la maîtrise des développements ne sera pas décrite dans ces travaux. Cependant, certains

documents produits et utilisés seront décrits puisqu'ils aident à mieux comprendre les systèmes de distribution électrique :

- Le « System Description Document » (SDD) : qui fournit une description générale du système d'intérêt. Une description fonctionnelle est généralement effectuée ainsi qu'une description organique des différents composants associés. Ce document a pour objectif de figer l'architecture système à différents jalons du développement.
- Les documents de spécifications « System Supplier Specification » (SSS) ou « Supplier Equipment Specification » (SES) : qui contiennent les exigences techniques concernant le système (SSS) ou les équipements associés (SES). Ces documents ont pour objectif de figer l'architecture système à différents jalons du développement.
- Les documents d'interfaces « Interface Control Document » (ICD) : qui permettent de définir puis de valider les interfaces internes et externes aux niveaux système et équipements.

Ponctuellement, pour des besoins de communication, des figures sont réalisés sous Visio. Certaines vues extraites de modèles se retrouvent alors dans une spécification ou le SDD. Bien que la syntaxe et la sémantique puissent être définies dans ces modèles, il apparaît que les règles de lecture changent pour chaque projet car il n'y a pas d'harmonisation.

L'ensemble de ces documents fournit un grand nombre de données et d'informations pour la capitalisation du savoir-faire. La section suivante va donc expliciter l'application de la méthodologie MMIP.

4.2. Application de la méthodologie

4.2.1. Processus stratégique

Pour rappel, l'objectif de ce processus est de définir les règles stratégiques qui seront à suivre pour l'application du processus opérationnel. Cette phase permet de réfléchir en amont à l'implémentation des différents niveaux d'abstraction proposés dans le Chapitre 3 en section 3.2. Les sous-sections suivantes s'intéresseront donc à :

- La définition des stratégies de capitalisation ;
- L'implémentation des niveaux d'abstractions de patron ;
- La définition des stratégies de réutilisation.

4.2.1.1. Définition des stratégies de capitalisation

L'objectif est ici de définir la marche à suivre afin de monter en niveau d'abstraction (au sens de la section 3.2.2). On décrit donc trois processus de passage d'un niveau N à un niveau N+1. La démarche sera réalisée sur le niveau fonctionnel, nous décrirons donc principalement les différentes actions permettant de réaliser l'exemple qui sera présenté.

Généralisation

Le niveau N est celui du modèle du projet. L'objectif est ici d'analyser les différentes vues du modèle afin d'extraire les fonctions et les échanges fonctionnels similaires. Le travail à effectuer est principalement un travail de factorisation par similarités. Le travail peut être décomposé en deux temps afin de réduire la complexité de la tâche de factorisation.

Cas d'utilisation

Dans le cas d'une généralisation de cas d'utilisation, l'objectif est de réaliser un travail de convergence. Si l'on prend l'exemple des cœurs électriques, il n'existe pas beaucoup de cas d'utilisation différents. Par contre il existe de très nombreuses manières d'exprimer ces cas. Lors des différentes études menées, cet aspect a été confirmé, notamment lors d'un audit interne sur la couche opérationnelle d'un projet en cours. Pour un cœur électrique, hormis des cas spécifiques, il convient donc surtout de se mettre d'accord sur deux cas d'utilisation génériques :

- un cas d'utilisation lors de la distribution de flux d'énergie (dans notre cas d'énergie électrique) ;
- un cas d'utilisation lors de la distribution de flux d'information (dans notre cas les données du système : statut des protections, configuration de la distribution,...).

Fonctions

Dans un second temps il est intéressant d'analyser la décomposition fonctionnelle du système. En effet, elle est déjà remplie d'informations exploitables pour extraire le savoir-faire d'ingénierie. Elle permet de rapidement identifier les fonctions qui se répètent ainsi que les sous-ensembles de fonctions similaires, voire identiques.

Le cas le plus simple est celui où la fonction X est répétée à différents endroits et de manière identiques. Dans ce cas la fonction est reprise directement au niveau générique.

Il est également intéressant de s'intéresser à des fonctions qui ne seraient pas identiques mais dont les objectifs sont similaires (de même nature, assimilable). Afin de repérer ces fonctions il est nécessaire de réaliser une analyse spécifique. Dans le cas où une fonction X ressemblerait à une fonction Y mais où de légères différences apparaissent, il est en effet nécessaire de poursuivre l'analyse avec un expert du domaine. Celui-ci permettra de définir si les fonctions poursuivent réellement les mêmes objectifs et permettra d'extrapoler une fonction générique XY. Sur la Figure 43, la fonction X dispose de 2 sous-fonctions (X1, X2). On retrouve des sous-fonctions similaires sous la fonction Y, cependant, cette dernière dispose de 3 sous-fonctions (Y1, Y2, Y3). Si l'on observe par exemple que, les sous-fonctions fonctions X1 et X2 sont identiques (les noms peuvent différer) aux sous-fonctions Y1 et Y2 car elles visent les mesures des mêmes variables du système. Il devient alors nécessaire de se poser la question de la nature de Y3 et de faire appel à un expert.

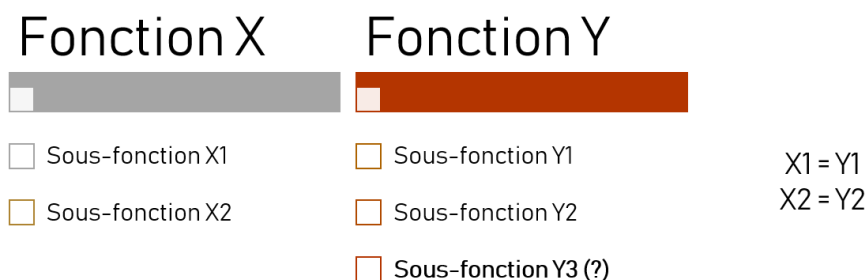


Figure 43. Exemple de deux fonctions similaires

Si l'analyse montre qu'au niveau des fonctions X et Y l'objectif est identique, dans ce cas, il faut généraliser une fonction sur la base de XY afin de pouvoir retrouver X ou Y lors de l'instanciation (Figure 44). En effet, il est possible que dans un contexte particulier du système (par exemple en mode normale), une sous-fonction soit nécessaire, tandis que dans un contexte différent celle-ci ne soit pas nécessaire (par exemple en mode d'urgence où l'objectif est de faire atterrir l'avion).

Fonction générique XY

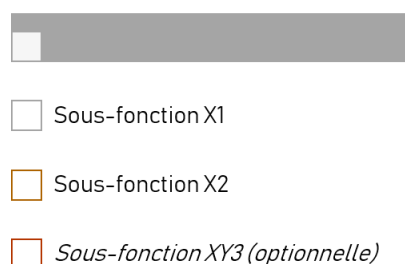


Figure 44. Fonction générique issue de deux fonctions similaires

Lors de la réutilisation il sera peut être nécessaire d'utiliser le concept de cardinalité (cf. Figure 42) afin de guider l'utilisateur. Ce cas est très souvent lié à la technologie remplissant la fonction. Dans le cas d'une protection dans un cœur électrique, il est possible d'ouvrir un contacteur à l'aide d'une commande, mais il est également possible d'isoler un équipement à l'aide d'un fusible qui se déclenche tout seul lorsqu'un seuil de tension est franchi. L'objectif est bien le même mais les fonctions qui entrent en jeu sont différentes.

Composants

Dans un troisième temps, pour la généralisation de composants, la démarche est différente car de nombreuses entreprises disposent déjà d'une librairie de composants physiques existante³⁰. L'objectif est donc plutôt de capitaliser les savoir-faire métiers qui pourraient faire l'objet d'erreurs ou d'oublis sur un futur développement. Par exemple, lors de la réutilisation d'une carte électronique, il sera intéressant de capitaliser la valeur de puissance électrique permettant de l'alimenter.

³⁰ En effet, afin de maîtriser le développement d'un produit en série, il est nécessaire de détenir la liste de l'ensemble des composants utilisés avec un moyen d'identification précis. Cela permet notamment de chiffrer le coût du produit final mais également de permettre des analyses plus fines (par exemple dans le cadre de la réglementation Reach sur les substances chimiques)

C'est en effet les interfaces qui seront critiques à ce niveau car fortement dimensionnantes sur le poids et le volume du composant et donc sur l'intégration dans le système final.

La généralisation est à réaliser dans le même langage que le modèle du projet. En effet, les mécanismes de réutilisation explicités en section 4.2.1.3 seront facilités si les modèles génériques sont exprimés dans le même langage que celui du projet à modéliser. De plus, cela permettra de faciliter la revue par les pairs du modèle générique, en conservant un formalisme connu.

Méta-modélisation

Le travail de factorisation et de capitalisation précédent a permis d'isoler les principaux concepts utilisés dans le modèle. Il s'agit désormais de traduire, de convertir, ces concepts dans un langage de modélisation indépendant du langage de modélisation métier.

Dans le cas de SEP, le choix a été fait d'utiliser le langage *Unified Modelling Language* ou *UML* (OMG, 2015a) et notamment le diagramme de classe afin d'exprimer les méta-modèles de modèles génériques. En effet, la capitalisation d'un système de distribution électrique nous a fourni des objets que nous souhaitions représenter dans un diagramme spécifique. De plus, le concept de classe permet la représentation statique des éléments utilisés dans les modèles génériques du système. De plus, les notions de hiérarchie, d'héritage, de composition et d'association permettent de décrire les méta-modèles reliant l'ensemble des concepts système à capitaliser.

Cependant, ce ne sont pas les seules raisons qui ont motivé ce choix. En effet, l'utilisation du langage UML fournit des perspectives intéressantes :

Pour le partage de modèles

L'un des objectifs poursuivis par la conception d'un méta-modèle est de faciliter le partage des modèles instanciés. Le langage UML est décrit conformément au standard *Meta-Object Facility* ou *MOF* (OMG, 2019) qui s'intéresse à la représentation et la manipulation de méta-modèles. Les objets produits suivant le MOF peuvent ensuite être décrits en *eXtensible Markup Language* ou *XML* en suivant la procédure *XML Metadata Interchange* ou *XMI* (OMG, 2015b). Cette dernière permet donc de représenter un modèle ou un métamodèle dérivé du méta-métamodèle MOF à l'aide du langage XML. Puisqu'UML et SysML utilisent XMI, l'intégration de ces standards fournit la capacité de partager les modèles et métadonnées.

Pour la validation ou vérification de modèle

En ISBM, la validation de modèles est un processus par lequel on s'assure que les éléments d'un modèle satisfont des contraintes ou règles spécifiques. Par exemple, une contrainte peut limiter les valeurs que prend l'attribut d'une classe en UML ou les liens possibles et disponibles entre les différents objets. Ces contraintes peuvent être définies dans la sémantique statique d'un métamodèle, puis vérifiées pour les instances du métamodèle.

Pour la transformation de modèles

Toute opération (automatique ou semi-automatique) qui est effectuée sur un modèle pour en produire un nouveau est considérée comme une transformation de modèles. Ces transformations sont par exemple utilisées pour vérifier qu'un ensemble de modèles est cohérent. La spécification d'une transformation définit des relations entre les éléments des métamodèles. Ensuite, l'exécution d'une transformation crée ou modifie des modèles selon les règles définies entre les métamodèles.

La transformation automatique de modèles est une capacité intéressante pour les activités fastidieuses ou susceptibles de conduire à une erreur, comme la représentation des informations d'un modèle dans une autre syntaxe (génération de documents,...) ou bien pour la génération de modèles d'analyse (simulation,...).

Abstraction

Pour le passage à ce niveau d'abstraction, il est plus difficile de fournir une règle explicite. En effet, ce passage met l'accent sur la créativité, l'objectif étant de fournir un patron abstrait ludique (avec lequel on puisse jouer pour le comprendre, le maîtriser) et non ambigu (même compréhension par tout le monde).

Dans le cadre de SEP, il a par exemple été déterminé que le concept de dominos permettait de créer des patrons abstraits pour les fonctions capitalisées. Cet exemple sera explicité en sous-section 4.2.2.1 paragraphe « Abstraction ».

4.2.1.2. Implémentation des niveaux d'abstraction de patrons

L'objectif de ce processus est d'enregistrer les modèles génériques, les patrons de conception et les patrons abstraits dans des bibliothèques qui sont intégrées dans des outils.

La création de ces bibliothèques outillées devra répondre à un certain nombre de besoins, afin de se révéler utile et pratique. Une partie des besoins exprimés par SEP sont présentés dans le Tableau 14 (*page suivante*). Ils s'appuient sur les travaux de carte d'identité de modèles de (Cloutier, 2006; Sirin, 2015). Ces travaux se sont intéressés à créer des catégories permettant d'exprimer les spécificités et propriétés d'un modèle en vue de l'identifier pour en faciliter sa réutilisation. Une partie de ces catégories sont réutilisées dans nos travaux car elles poursuivent l'objectif commun de classer les modèles.

Tableau 14. Expression de besoins pour les librairies

ID	Expression de besoin
B.1	<p>La librairie doit permettre de sauvegarder un cas d'utilisation, une fonction (ou un ensemble de fonctions), un composant (ou un ensemble de composants) avec des éléments associés à leurs <u>propriétés intrinsèques</u> :</p> <ul style="list-style-type: none"> • Nom (paramétrables) • Format (arrangement du diagramme) • Sous-cas d'utilisation, sous-fonctions, sous-composants (de manière récursive) • Flux internes (pour fonctions et composants) <ul style="list-style-type: none"> ○ Nom (paramétrables) ○ Type ○ Autres attributs non dépendants d'allocations • Attributs (type, DAL, ...) • Pour les fonctions et composants, les ports associés avec : <ul style="list-style-type: none"> ○ Nom (paramétrables) ○ Type ○ Orientation (I,O,I/O) ○ Attributs non dépendants d'allocation (cardinalité,...)
B.2	<p>La librairie doit permettre de sauvegarder un cas d'utilisation, une fonction (ou un ensemble de fonctions), un composant (ou un ensemble de composants) avec des éléments associés à leurs traçabilité :</p> <p>Pour les <i>cas d'utilisation</i></p> <ul style="list-style-type: none"> • Besoins • Cycle de vie <p>Pour les <i>fonctions</i></p> <ul style="list-style-type: none"> • Exigences (paramétrables) <ul style="list-style-type: none"> ○ Liées à : <ul style="list-style-type: none"> ▪ Fonction ▪ Sous-fonctions ▪ Ports ▪ Flux ▪ Dans une organisation identique à la hiérarchie existante lors de la sauvegarde de la fonction ○ Attributs non liés à de l'allocation • Modes <p>Pour les <i>composants</i></p> <ul style="list-style-type: none"> • Exigences (paramétrables) <ul style="list-style-type: none"> ○ Liées à : <ul style="list-style-type: none"> ▪ Composant ▪ Sous-composants ▪ Ports ▪ Flux ▪ Dans une organisation identique à la hiérarchie existante lors de la sauvegarde de la fonction ○ Attributs non liés à de l'allocation • Configurations techniques
B.3	La librairie de fonctions doit permettre de personnaliser le rangement des éléments mis en librairie.
B.4	La librairie de fonctions doit permettre de rechercher les éléments mis en librairie.
B.5	La librairie de fonctions doit permettre d'effectuer des mises à jour des éléments mis en librairie.

B.6	<p>La librairie de fonctions doit permettre d'associer une fiche/un guide à l'élément mis en librairie contenant :</p> <ul style="list-style-type: none"> • Nom • Alias connu (par projet par exemple) • Mots-clés • Contexte • Description • Solution • Visualisation (diagramme) • Auteur(s) • Date de création et de dernière modification • Statuts <ul style="list-style-type: none"> ○ Validé ○ Brouillon ○ Recommandé ○ Obsolète (pour le gestionnaire de librairie mais pas dans la vue utilisateur)
B.7	La librairie de fonctions doit permettre l'instanciation des paramètres lors de l'import d'une fonction dans un modèle.
B.8	La librairie de fonctions doit permettre de rattacher une fonction importée à une fonction existante dans le modèle lors de l'instanciation.
B.9	La librairie de fonctions doit fournir des données statistiques sur le nombre d'utilisations des éléments en librairie.

L'objectif est donc de permettre de classer les patrons en fournissant des critères pour les différencier et donc les ranger. Mais il est également nécessaire de pouvoir les retrouver et de fournir des capacités spécifiques à la réutilisation comme la visualisation dans un diagramme du résultat final ou encore l'instanciation de paramètres lors de la modélisation finale.

4.2.1.3. Définition des stratégies de réutilisation

L'objectif est ici de définir la marche à suivre afin de descendre en niveau d'abstraction. On décrit donc trois processus de passage d'un niveau N+1 à un niveau N.

Concrétisation

Dans le cas où l'objet de départ de la réutilisation est un patron abstrait, il est nécessaire d'identifier les concepts fondamentaux qui sont utilisés afin de pouvoir les traduire dans un langage de modélisation formalisé.

Dans le cas de SEP, il s'agit de traduire les patrons abstraits en langage UML. Il est donc nécessaire d'identifier les objets à manipuler et leurs relations (hiérarchies, héritages, associations,...).

Projection

Afin de réutiliser les concepts définis dans le patron de conception, il est nécessaire de traduire les concepts dans un langage adapté pour l'ingénieur. Afin de faciliter la compréhension et l'utilisation des concepts, la création d'un modèle générique rangé à un endroit pertinent dans une librairie de l'outil est nécessaire.

Il ne sera pas précisé ici les mécanismes de projection d'un patron de conception en modèle générique en raison de la multitude de langages de modélisation utilisés par les ingénieurs.

Il faudra néanmoins prendre en compte les spécificités de ceux-ci et notamment porter une attention particulière sur les possibles différences entre les concepts manipulés. Un exemple de transposition est proposé en sous-section 4.2.2.3 dans le paragraphe « Projection ».

Instanciation

L'objectif est ici de définir la manière dont l'utilisateur pourra prendre un extrait de modèle générique en librairie afin de le réutiliser, et cela dans deux cas qui ne sont pas forcément distincts :

- le modèle générique est utilisé pour initier la modélisation ;
- le modèle générique est utilisé dans un modèle déjà existant.

Le premier cas pose le moins de difficulté puisqu'il part de la « page blanche », il n'y a donc pas de contrainte à prendre en compte si ce n'est de disposer de la capacité d'instancier les paramètres du modèle générique.

C'est le deuxième cas qui va se révéler plus délicat. En effet, l'insertion d'un modèle instancié dans un modèle pré-existant est soumis à de nombreuses contraintes. Il faut tout d'abord s'assurer que l'insertion s'effectue au bon endroit du modèle, c'est-à-dire, que l'on introduit le bon patron dans la bonne partie du modèle. Afin de s'assurer de cette exactitude, il est nécessaire d'être rigoureux dans le classement des « patrons » en bibliothèque, que ce soit dans la description ou dans les capacités à rechercher ces derniers (cf. besoins exprimés en sous-sections précédentes).

Ensuite, il faut réussir à insérer le bout de modèle instancié sans porter atteinte à l'intégrité du modèle existant et sans perte d'informations. Pour cela, il sera nécessaire de fournir des règles d'insertion comme cela est préconisé dans les travaux de (Gasser, 2012) sur une « *insert policy* » afin de redimensionner le diagramme efficacement. Ainsi, il faudra déterminer des points d'insertion sur lesquels on pourra venir « brancher » les éléments instanciés à partir des modèles génériques. Cela permettra également de réduire le temps consacré à l'arrangement des diagrammes.

4.2.2. Processus opérationnel

Pour rappel, l'objectif de ce processus est d'appliquer les différentes stratégies définies dans le processus stratégique. Cela correspond à la mise en pratique des processus de capitalisation, classement en librairie et réutilisation.

4.2.2.1. Capitalisation du savoir-faire

En raison de travaux en cours chez Safran, la couche fonctionnelle a été retenue comme base de travail et fait donc l'objet de l'exemple qui va suivre. L'objectif est donc de présenter ici la manière dont les patrons ont été capitalisés et la manière dont ils aideront à reconstruire une partie de la couche fonctionnelle. Pour cela, une preuve de concept a été réalisée en suivant la démarche opérationnelle présentée en section 3.3.3

et dont les stratégies de capitalisation et de réutilisation ont été présentées dans la section précédente.

Généralisation

La démarche commence par la généralisation de parties de modèles³¹ en modèles génériques. En observant d'abord la décomposition fonctionnelle, il est possible d'identifier 5 sous-fonctions similaires dans la fonction de haut niveau « *Configure Network* » (Figure 45) :

- Distribute Normal 230Vac ;
- Distribute Normal 115Vac ;
- Distribute Normal 28Vdc ;
- Distribute EMER 230Vac ;
- Distribute EMER 28Vdc.

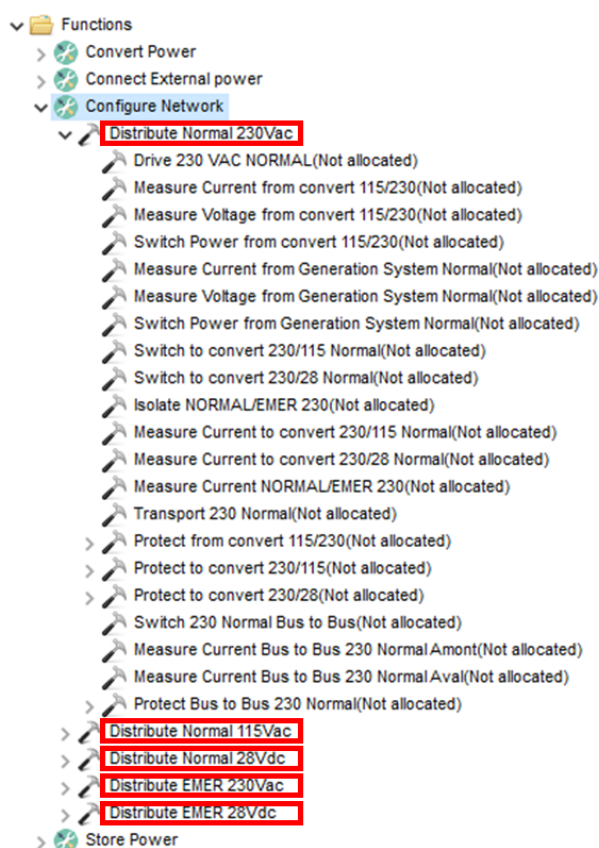


Figure 45. Décomposition fonctionnelle d'un système de distribution électrique présentant des similarités qu'il est possible de généraliser

Cette similarité est identifiable par l'utilisation du même verbe qui indique des objectifs similaires. En effet, les variantes dans le reste du nom des fonctions sont assimilables à des paramètres propres au domaine de la distribution électrique :

- Le premier concerne le contexte de la distribution d'énergie. Sans défaillance on est dans le cas [Normal]. Lorsqu'une défaillance est trop

³¹ L'ensemble des figures 7 à 19 sont des diagrammes extraits de modèles réalisés avec X-ATIS (outil support de l'ISBM réalisé en interne par Safran Engineering Services).

importante et que l'objectif est de réussir à faire atterrir l'avion on est dans le cas [EMER] ;

- Le deuxième concerne la [valeur] et le [type] de courant qui est distribué. Classiquement pour un cœur électrique, on retrouve le 230 Vac, le 115 Vac et le 28 Vdc.

Pour conserver une généralité dans la formulation, nous écrivons « Distribute [Normal, Emergency] [valeur][type] », où [valeur] \in [230, 115, 28] et [type] \in [Vac, Vdc]. Ainsi, il est possible de déterminer une décomposition fonctionnelle générique pour ces fonctions (Figure 46). Il est alors intéressant de préciser la cardinalité sur les fonctions génériques. Dans notre exemple, lors d'une future réutilisation, il faudra (de manière assez logique) au moins une fonction « Emergency » et une fonction « Distribute ». Cependant, il n'y a pas de restrictions sur le nombre total de chacune de ces fonctions, ainsi, la cardinalité est donc de « 1..n ».

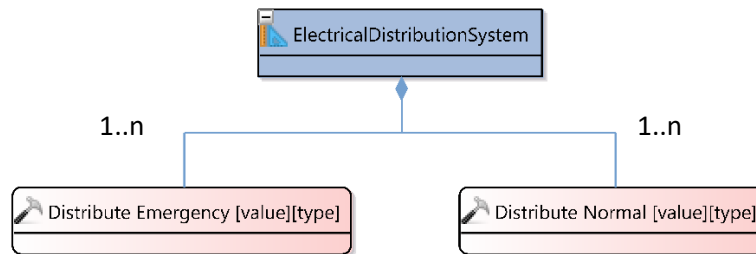


Figure 46. Décomposition fonctionnelle générique

Afin de confirmer la similarité et justifier une généralisation, une analyse plus approfondie est nécessaire. Il faut donc également s'intéresser à l'architecture fonctionnelle qui présente les échanges de flux entre les fonctions. Afin de travailler sur la généralisation des fonctions souhaitées, une première étape d'extraction des vues de ces fonctions a été réalisée. Cette extraction a consisté à créer des vues des plus proches voisins des fonctions identifiées : les autres fonctions (en rose) et les parties prenantes externes au système (en bleu). Pour les flux, les couleurs permettent de distinguer les flux électriques (en bleu), des flux d'informations (*data*) typés « *hardware* » (en rouge) ou « *numériques* » (en vert). C'est à partir de ces vues (Figure 47, Figure 48, Figure 49), qu'il a été possible d'effectuer un travail de généralisation afin d'obtenir l'environnement fonctionnel générique pour la distribution en configuration normale (Figure 50).

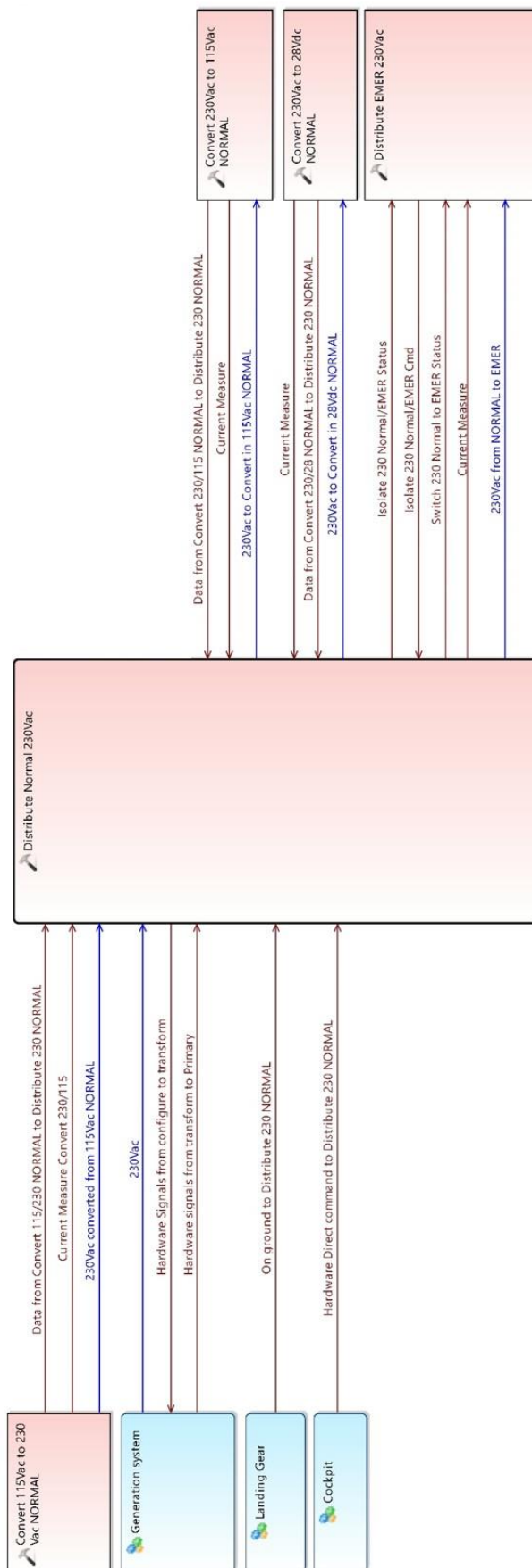


Figure 47. Environnement de la fonction « Distribute Normal 230 Vac »

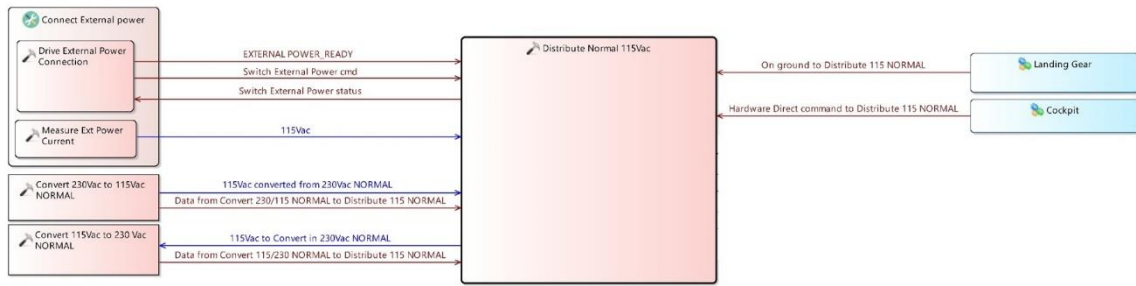


Figure 48. Environnement de la fonction « Distribute Normal 115 Vac »

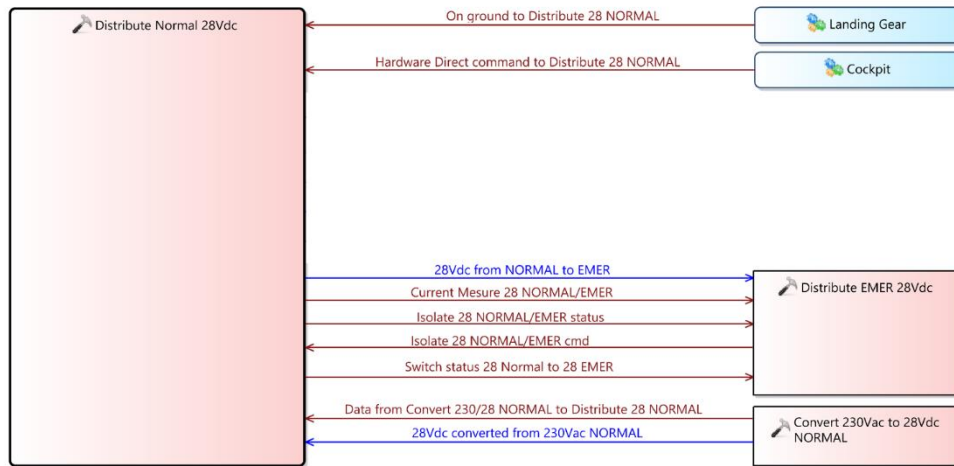


Figure 49. Environnement de la fonction « Distribute Normal 28 Vdc »

La démarche ayant permis d'obtenir l'architecture fonctionnelle générique d'une distribution électrique en configuration normale (Figure 50) sera illustrée via la généralisation de l'architecture fonctionnelle entre une fonction de distribution et de conversion.

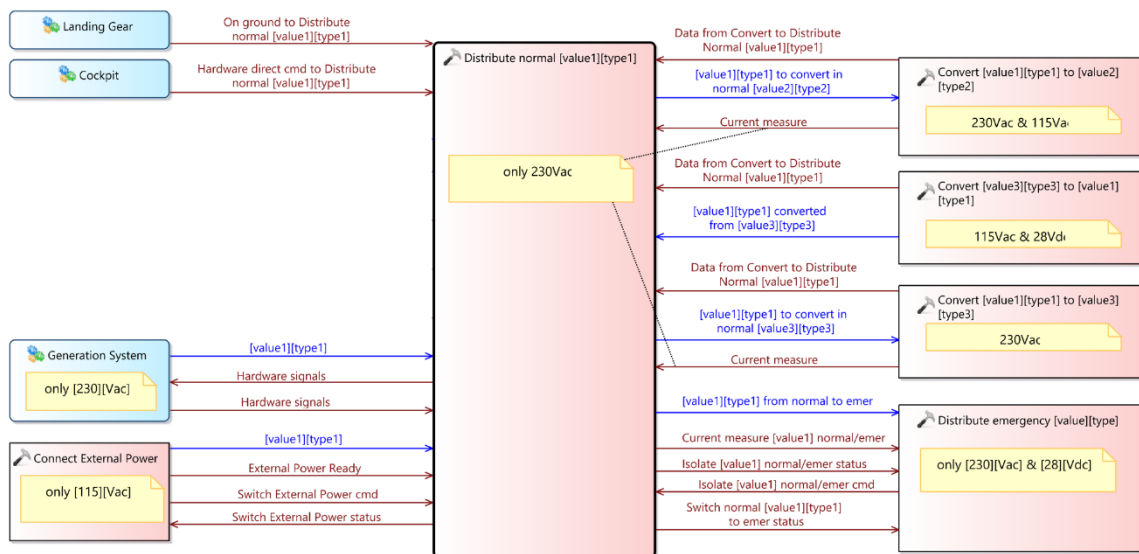


Figure 50. Environnement fonctionnel générique d'une fonction « Distribute normal »

En analysant les vues correspondant à la distribution normale du 230 Vac, 115 Vac et 28 Vdc, il est possible d'identifier une similarité d'ingénierie dans les flux échangés lors d'une conversion d'énergie. La Figure 51 se focalise sur les flux échangés avec les fonctions de conversions respectives des différentes valeurs et types de puissance électrique.

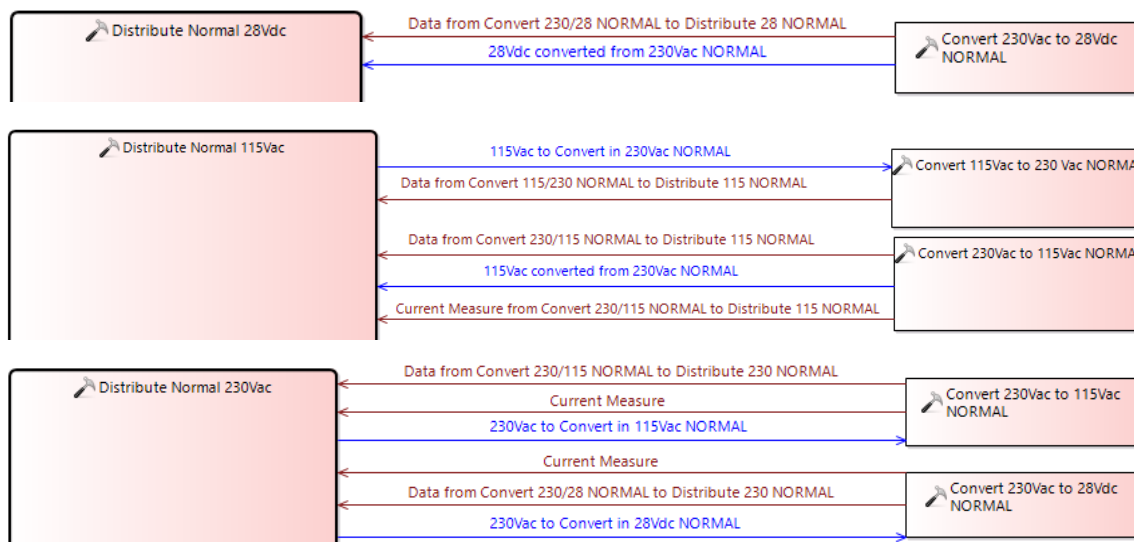


Figure 51. Flux fonctionnels entre les fonctions de distribution et de conversion

En observant les flux de puissance en bleu, il est possible d'observer que les flux et leur nom sont en réalité équivalents ; en effet, seuls les paramètres de [valeur] et de [type] varient. Il est également possible d'observer que deux types de fonction de conversion sont possibles : soit la puissance distribuée est convertie dans une autre [value][type], soit une autre [value][type] de puissance est convertie afin de fournir à la fonction la bonne puissance à distribuer. Dans le cas du 28Vdc il n'y a qu'une fonction de conversion, il faut donc que cette spécificité apparaisse lors de la généralisation. Il est donc possible de généraliser ces flux et fonctions afin d'obtenir une « brique » de modèle générique (Figure 52).

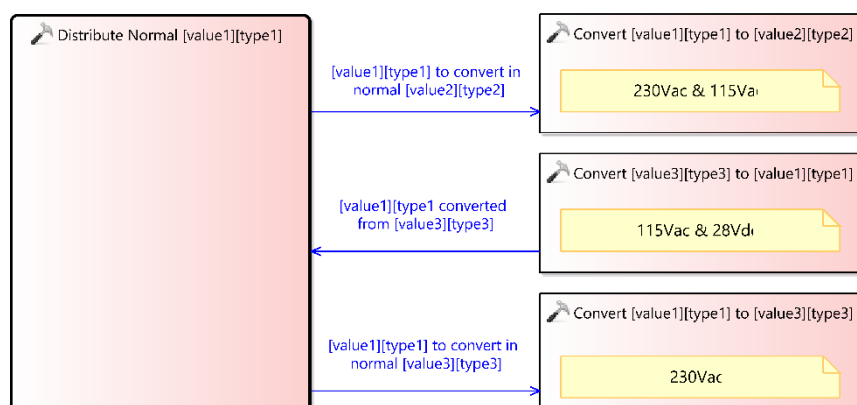


Figure 52. Environnement générique préliminaire pour la distribution normale (a)

L'importance de la gestion des paramètres en librairie est d'autant plus importante dans le cas des conversions qu'il sera nécessaire de pouvoir automatiser la génération d'un modèle selon le type de distribution à modéliser. En effet, en plus de

la présence ou non de certaines fonctions selon [value][type], il est nécessaire d'expliciter les différentes conversions de puissance qui auront lieu. Ainsi, il est nécessaire de préciser que :

```

si [value1][type1] == 115Vac
    alors [value2][type2] == [value3][type3] == 230Vac
si [value1][type1] == 28Vdc
    alors [value3][type3] == 230Vac
si [value1][type1] == 230Vac
    alors [value2][type2] == 115Vac && [value3][type3] == 28Vdc
  
```

Dans un premier temps les flux de puissance ont été généralisés, il reste donc maintenant les flux d'informations. Il est possible d'observer que toutes les fonctions de conversion envoient des flux en direction de la fonction de distribution. Il est encore une fois possible de généraliser les flux à l'aide de paramètres. À noter que dans le cas spécifique du 230Vac, il apparaît deux nouveaux flux « *Current measure* » qui sont nécessaires pour alimenter des fonctions de protection interne spécifiques (Figure 53).

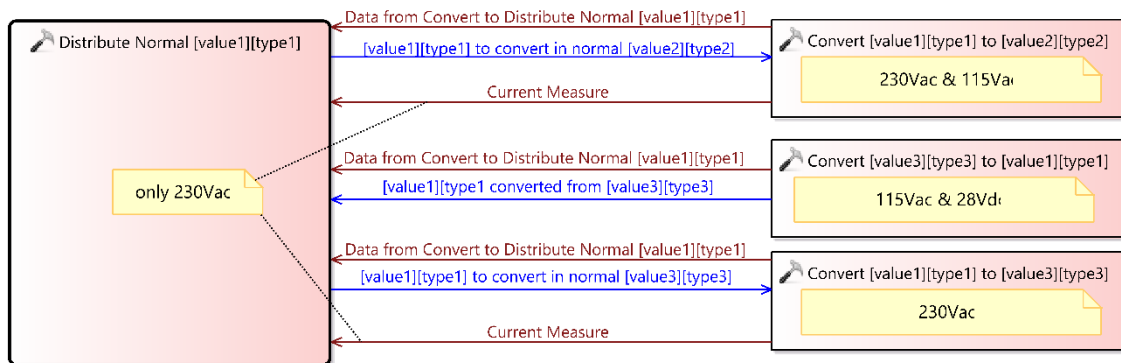


Figure 53. Environnement générique pour la distribution normale (b)

À partir de la décomposition fonctionnelle de la Figure 45, il a donc été possible de généraliser un premier niveau de fonctions. Cependant, ces fonctions partagent également un ensemble de sous-fonctions. En effet, en observant l'architecture fonctionnelle de niveau N-1 on remarque des chaînes fonctionnelles similaires entre la distribution normale en 230Vac (Figure 54) et la distribution normale 115Vac (Figure 54). La chaîne qui est analysée ici correspond à la distribution de la puissance provenant ou se dirigeant vers une fonction de conversion. La comparaison n'est pas faite avec la distribution normale 28Vdc car il n'y a pas de conversion du 28Vdc dans une puissance différente.

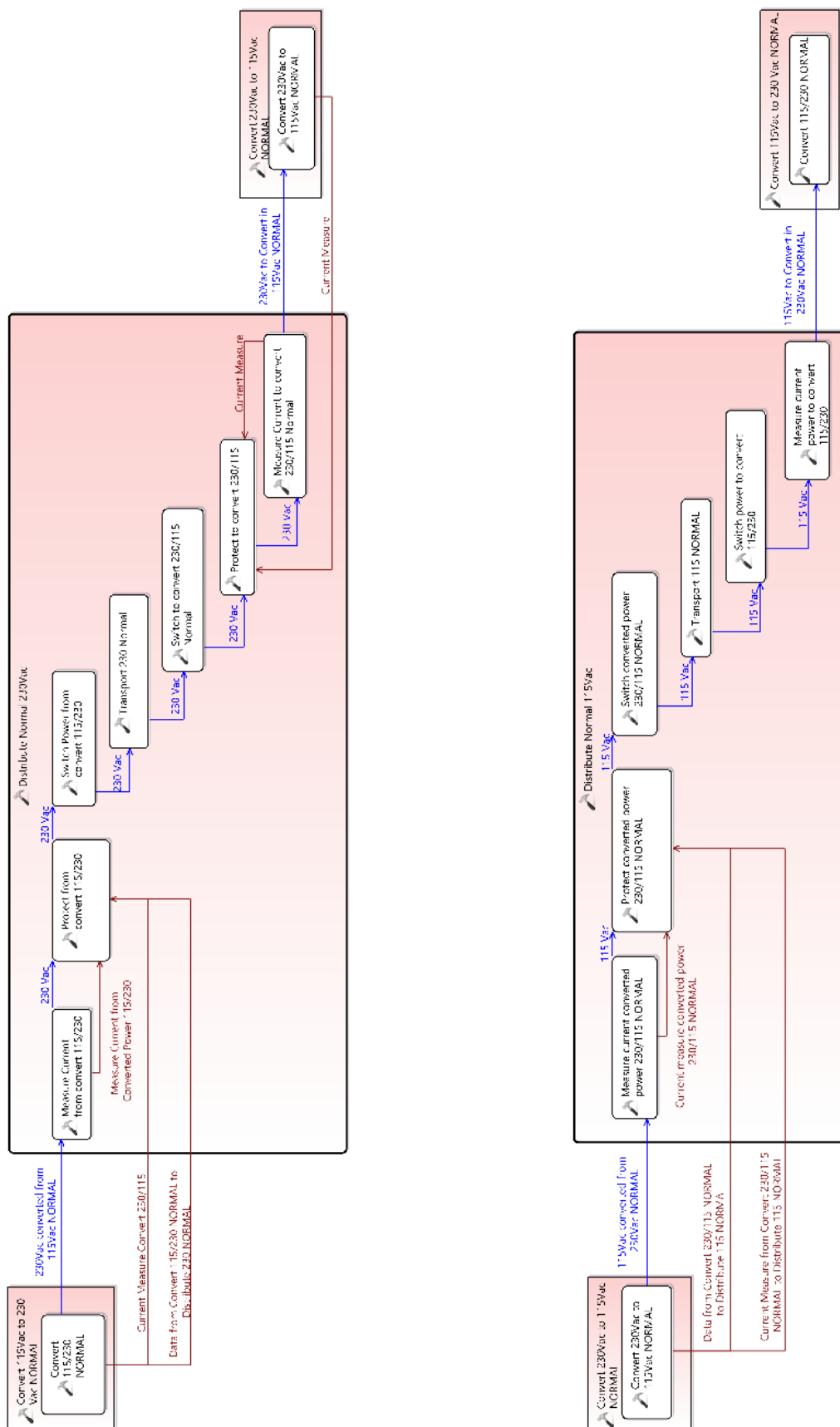


Figure 54. Extrait d'une chaîne fonctionnelle de la distribution normale en 230Vac (à gauche), de la distribution normale en 115Vac (à droite)

À partir des chaînes fonctionnelles extraites, il est possible de distinguer trois sous-parties différentes :

1. Une sous-fonction de transport identique (centrale);
2. Des sous-fonctions de distribution similaires (amont et aval) ;
3. Des sous-fonctions de conversion similaires (amont et aval).

Dans le premier cas, les fonctions « *Transport 230 Normal* » et « *Transport 115 NORMAL 115Vac* » sont généralisables en une fonction générique « *Transport normal [value][type]* ».

Dans le troisième cas, les fonctions « *Convert 230Vac to 115Vac NORMAL* » et « *Convert 115VAac to 230Vac NORMAL* » sont généralisables en une fonction générique « *Convert [value1][type1] to [value2][type2]* ».

Dans le deuxième cas, il y a une différence dans la décomposition fonctionnelle. En effet, bien que les fonctions « *Switch ...* » et « *Measure ...* » soient identiques à leurs homologues, il apparaît que dans le cas du 230Vac une fonction supplémentaire est présente : « *Protect to convert ...* ». Cette fonction supplémentaire explique l'apparition d'un flux supplémentaire « *Current Measure* ». En effet, la fonction de protection a besoin de la mesure du courant afin de la comparer à des valeurs seuils liées aux déclenchements des protections. Dans le cas du 115Vac, la protection entre le transport et la conversion n'est tout simplement pas réalisée au niveau de la distribution mais dans une autre fonction qui enverra une commande dans la fonction « *Switch power ...* » en cas de besoins

En analysant également les fonctions en amont et en aval de la fonction de transport, il apparaît une fonction générique « *Distribute [value][type] from convert* », qui est similaire à la fonction « *Distribute [value][type] to convert* ». Du point de vue de la décomposition fonctionnelle générique, cette dernière est identique (Figure 56). Concernant l'enchaînement fonctionnel, l'ordre des fonctions « *Protect ...* », « *Switch ...* » et « *Measure current ...* » est indifférent pour le système car au niveau organique, les composants qui porteront ces fonctions seront également dans un ordre indifférent. L'enchaînement présenté correspond à une convention de modélisation interne mais ne constitue pas une règle métier.

Il est donc possible de généraliser la chaîne fonctionnelle comme représentée en Figure 55.

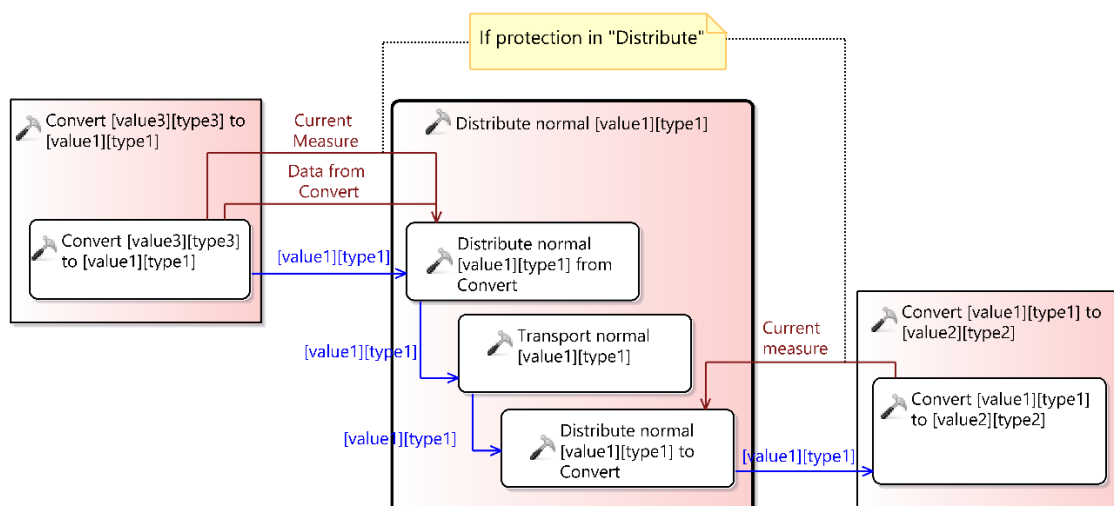


Figure 55. Chaîne fonctionnelle générique du transport à la conversion d'une distribution normale

Il en résulte cependant une alternative fonctionnelle (l'une ou l'autre) en raison de la fonction de protection, dépendant du fait que celle-ci soit réalisée en « interne » de la fonction « *Distribute ...* » ou bien en « externe » et donc gérée dans une autre fonction (Figure 56).

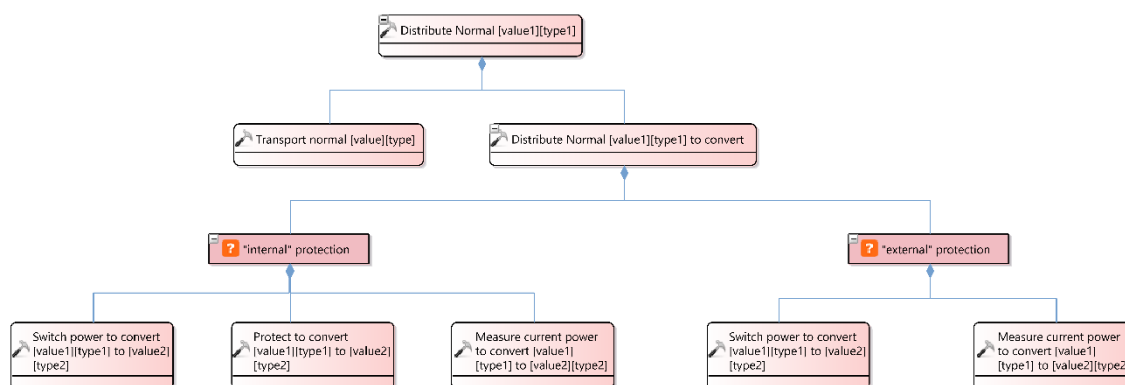


Figure 56. Extrait de la décomposition fonctionnelle de la fonction distribution normale générique

L'analyse de l'amont et de l'aval de la fonction de transport concernant la conversion nous a permis de généraliser des parties de modèles. Ces modèles génériques sont d'autant plus intéressants qu'ils fournissent également des règles métiers sur les systèmes de distribution, qu'il est plus difficile à percevoir à ce niveau. En effet, il faut remonter en niveau d'abstraction afin de pouvoir extraire ces règles. En suivant donc les niveaux d'abstraction proposés dans ces travaux (section 3.2), les modèles génériques obtenus seront méta-modélisés dans le paragraphe suivant.

Méta-modélisation

En se basant sur les analyses réalisées pour la généralisation, il est possible d'identifier des relations entre les fonctions qui sont méta-modélisables via un

diagramme de classe UML³². Dans la Figure 57, le patron de conception identifié précédemment est représenté.

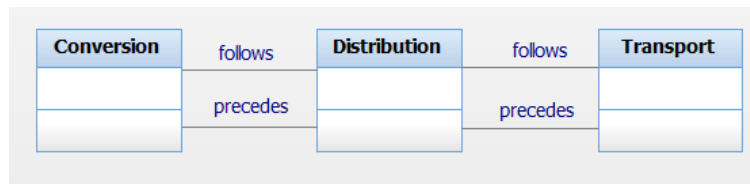


Figure 57. Patron de conception concernant les fonctions génériques :
Conversion – Distribution – Transport

Ces patrons de conception capitalisent des relations de précédence entre les fonctions du système de distribution électrique. En ce sens, il faut comprendre :

1. Une fonction de conversion peut précéder ou suivre une fonction de distribution. De même, une fonction de distribution peut précéder ou suivre une fonction de conversion.
2. Une fonction de transport peut précéder ou suivre une fonction de distribution. De même, une fonction de distribution peut précéder ou suivre une fonction de transport.
3. Une fonction de conversion ne pourra jamais avoir de relation directe avec une fonction de transport.

Il a également été possible de méta-modéliser la décomposition fonctionnelle générique. La Figure 58 capitalise par exemple celle de la fonction de distribution précédente en sauvegardant les relations de compositions internes. Ainsi les fonctions « *Measure* », « *Protection* », et « *Switch* » ne peuvent pas exister plus d'une fois par fonction « *Distribution* ». Elles peuvent également être absentes. Cependant, il est évident qu'il faut qu'au moins une sous-fonction existe, sinon la fonction « *Distribution* » n'a pas de raisons d'exister.

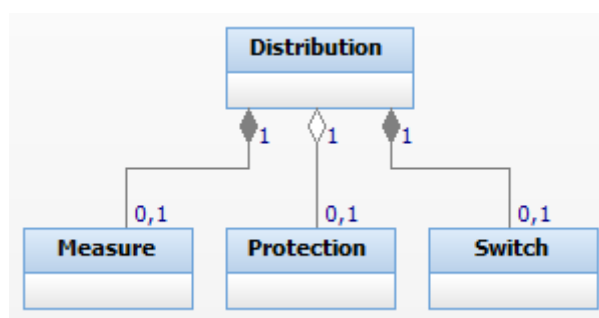


Figure 58. Patron de conception de la décomposition fonctionnelle d'une fonction de distribution

Le passage par méta-modélisation a donc deux objectifs dans notre exemple :

1. Capitaliser la décomposition fonctionnelle générique d'un système de distribution électrique.

³² Comme nous l'avons indiqué précédemment en section 4.2.1.1, paragraphe « Méta-modélisation » (p.14), nous changeons d'outil et de langage.

2. Capitaliser les chaînes fonctionnelles génériques ainsi que les règles métiers les accompagnant.

Le niveau de formalisation de ce niveau peut être difficilement appréhendable pour des non-spécialistes, c'est pourquoi le passage de ces patrons au niveau patron abstrait permettra de fournir un format pédagogique et clair dans le cas d'un partage de savoir-faire.

Abstraction

L'intérêt de l'abstraction est d'exprimer des concepts dans un langage plus facile d'accès. Nos travaux estiment également important que les patrons abstraits portent des messages simples. En ce sens, pouvoir résumer en une phrase l'idée que l'on veut transmettre, favorisent la création d'un patron abstrait pertinent.

Dans notre exemple, l'objectif est d'expliquer que des règles d'architecture des chaînes fonctionnelles existent et doivent être impérativement respectées pour développer le système. Autrement dit, les fonctions s'enchaînent mais avec des règles à suivre. En effet, une fonction A pourra échanger des flux avec une fonction B, mais ne pourra, par exemple, jamais être en relation directe avec une autre fonction C. De plus, dans notre cas, certains enchaînements de fonctions sont toujours les mêmes et réutilisés en différents endroits du modèle.

La notion de « domino » s'avère efficace pour exprimer de manière simple ces spécificités. Le jeu de domino est en effet connu par un grand nombre de personnes, de même que son principe essentiel, qui consiste à aligner les pièces de dominos entre elles, à la suite les unes des autres, et en les combinant : un des côtés du domino posé doit porter le même nombre de points que le domino sur la table (Figure 59).

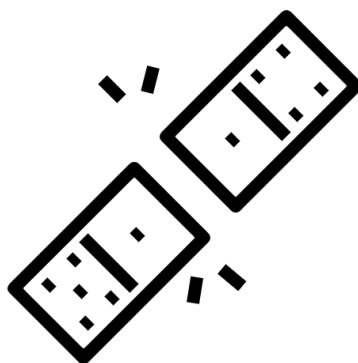


Figure 59. Principe essentiel de combinaison du jeu de domino

Maintenant que nous disposons du message à transmettre ainsi que du format du média de transmission, il est possible d'abstraire les méta modèles pour obtenir des patrons abstraits. Cela débute par l'extraction de fonctions élémentaires (à gauche sur la Figure 60) dont on va pouvoir se servir pour construire des pièces de dominos (à droite sur la figure Figure 60).

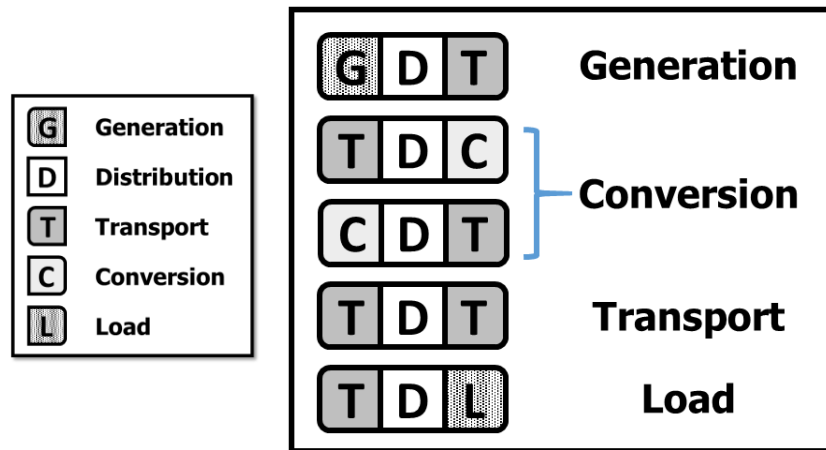


Figure 60. Fonctions élémentaires (à gauche), pièces de dominos (à droite)

Ces pièces de dominos sont accompagnées de règles sur la façon de les assembler. La première est la plus évidente :

Pour combiner deux pièces de dominos, il faut connecter des pièces qui partagent au moins un côté identique.

Les fonctions « G » et « L » correspondent aux fondamentaux de notre système d'intérêt qui, pour rappel, vise à distribuer l'énergie électrique produite par les génératrices aux charges électriques (consommatrices). Les fonctions « D », « T », et « C » ne sont autres que celles dont nous avons parlé dans les paragraphes précédents. Concernant les pièces de dominos pour la génération et les charges, une deuxième règle est édictée :

Les côtés dont le fond est en pointillé ne sont combinables avec aucune autre pièce.

La raison est simple, « G » est notre point de départ, et « L » notre point d'arrivée.

Les patrons de conception qui ont été réalisés précédemment ont permis de construire les pièces concernant de l'énergie électrique provenant d'une conversion (« C – D – T ») ou de l'énergie électrique à convertir (« T – D – C »). Concernant le transport d'énergie électrique (« T – D – T »), la pièce est construite de manière à respecter la troisième règle édictée :

Lorsque deux côtés ou plus identiques sont combinés, ces côtés ne forment alors qu'une seule et même partie du domino.

L'objectif de cette règle est de faire émerger des besoins au niveau d'un système. L'exemple proposé en Figure 61 présente un principe simple. L'objectif est d'amener de l'énergie électrique de « G » vers « L ». À l'aide des pièces de dominos, il est possible de construire l'enchaînement fonctionnel minimal entre une génératrice et une charge. La traduction de ces dominos en schéma électrique conduit à identifier que la combinaison des « T » impliquent un élément pour faire transiter l'énergie électrique, i.e. un bus de transport.

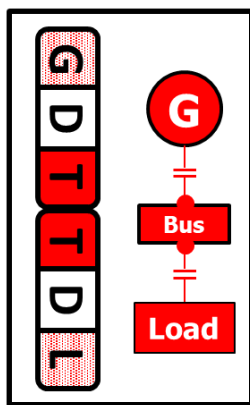


Figure 61. Exemple d'utilisation des dominos

L'utilisation des patrons abstraits permet d'aller plus loin que la seule explication d'enchaînement fonctionnel. Il est donc également possible de s'intéresser à un exemple un peu plus fourni afin de percevoir l'intérêt des patrons d'abstraction. En effet, ces derniers vont permettre de faire émerger des besoins à exprimer dans un futur système à partir de la capitalisation des systèmes précédents.

Dans le cas d'un système de distribution qui doit distribuer l'énergie produite par 3 générateurs vers 2 charges, il est possible de commencer à poser des pièces de dominos (Figure 62.). Les couleurs rouges et bleues indiquent des puissances électriques associées à des [value][type] différents. En effet, les charges consomment rarement directement la puissance générée par une génératrice.

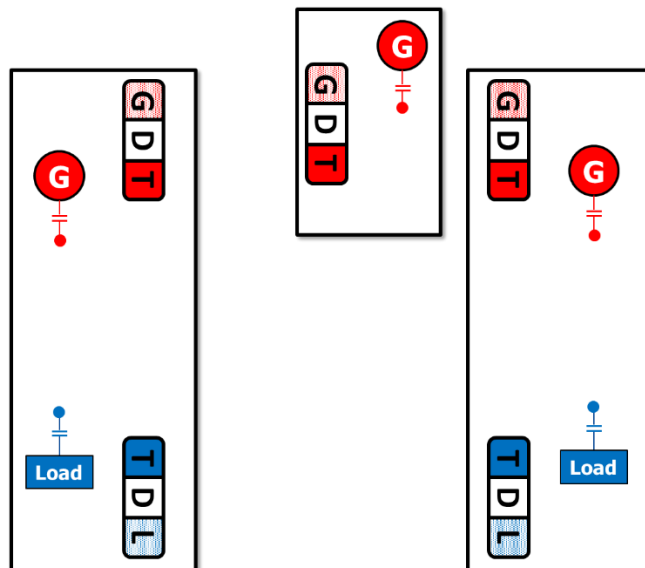


Figure 62. Initialisation des pièces de dominos

Pour passer l'énergie électrique de rouge à bleue, il est donc nécessaire qu'une fonction agisse sur ce flux. Pour cela, il est possible d'utiliser les pièces de dominos concernant la conversion car elles permettent ce « changement de couleur ». Cela permet donc de connecter les génératrices et les charges et de faire émerger les besoins d'une fonction de conversion d'énergie qui sera allouée sur un organe dédié. En

complétant avec les pièces de dominos restantes, il est possible de réfléchir rapidement à l'aide de concept d'architecture (Figure 63.).

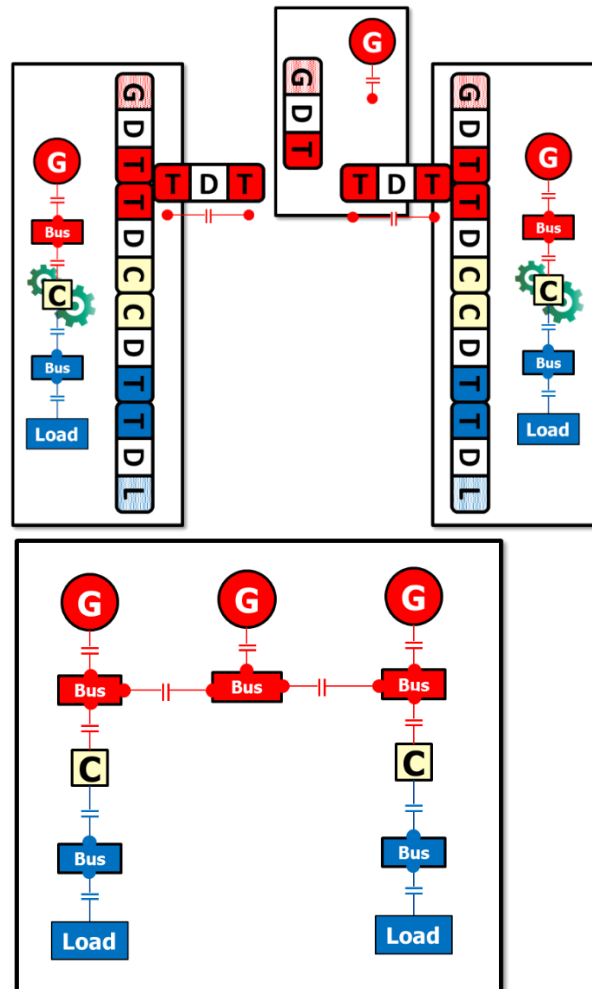


Figure 63. Exemple pour un système de distribution de 3 génératrices et 2 charges

4.2.2.2. Classification et maturation en librairie des actifs d'ingénierie

Il a été présenté dans la sous-section précédente un exemple de capitalisation de savoir-faire concernant l'architecture fonctionnelle d'un cœur électrique, depuis les modèles génériques jusqu'aux patrons abstraits. Il apparaît nécessaire de stocker ces éléments afin de pouvoir les réutiliser. La finalité de la démarche étant l'appropriation du savoir-faire encapsulé par le plus grand nombre afin de favoriser la réutilisation et augmenter l'efficacité des futurs développements. Le stockage de ces éléments devra être flexible afin de pouvoir notamment réaliser des mises à jour et évoluer en maturité. Il est donc nécessaire de créer une librairie en répondant aux besoins exprimés en section 4.2.1.2 et aux exigences spécifiques à chaque entreprise. En effet, de nombreuses contraintes vont s'exercer sur le concept de librairie et auront un impact direct sur l'implémentation de cette dernière dans un outil support de la méthode d'ISBM.

Cependant, durant ces travaux, l'un des objectifs sous-jacent est de ne pas s'attacher à l'outil utilisé car l'approche méthodologique doit être réalisable avec tous les outils. De plus, le développement d'un outillage de la librairie ne fait pas partie des

objectifs de la thèse et se trouvait également trop complexe à réaliser dans le cadre d'outils fermés (concept non existant et code non accessible) ou semi-ouverts (concept non existant mais API disponible). Cette sous-section vise donc uniquement à exposer les bonnes pratiques pour réaliser la sauvegarde, la maturation puis la réutilisation des actifs d'ingénierie dans une librairie.

Sauvegarde

Pour la sauvegarde, il est nécessaire d'associer des éléments qui permettront de guider l'ingénieur lors de la réutilisation. En s'inspirant des travaux de (Cloutier, 2006; Sirin, 2015), ces éléments vont être résumés sous la forme de fiches d'accompagnements. Ces fiches doivent contenir un certain nombre d'informations et visent principalement à :

1. Permettre de trouver ou retrouver un patron ;
2. Permettre de mettre à jour un patron ;
3. Permettre de guider la réutilisation et l'instanciation du patron.

Comme nous l'avons vu dans le Chapitre 2 section 2.1.2.1 une partie des connaissances existe mais n'est pas connue de l'ingénieur. Il est donc important de faciliter le partage des patrons auprès du plus grand nombre, sinon, la librairie n'apportera aucune valeur ajoutée puisque personne n'en connaîtra l'existence.

Il pourra être intéressant par exemple, que le chef de programme et de projet imposent un objectif de réutilisation (pourcentage) en début de projet afin de valoriser l'expertise de l'entreprise. La librairie devra dès lors être capable de satisfaire le point numéro 1 (recherche de patrons). Pour cela, les patrons ne pourront pas seulement être sauvegardés avec leurs fiches individuelles, il sera nécessaire de créer une organisation interne structurée. Dans notre cas, l'utilisation d'un cadre pour la modélisation nous fournit un avantage indéniable. En effet, l'organisation du modèle fournira la structure d'organisation de haut niveau de la librairie. Pour rappel de la section 4.1.1.3, la librairie s'organise donc en trois niveaux (opérationnel, fonctionnel, organique) pour lesquels il est possible de retrouver, respectivement, des cas d'utilisation, des fonctions et des organes (logiques ou physiques).

Ensuite, il est possible et recommandé de raffiner en classant chaque concept dans des catégories afin de permettre de faciliter la recherche. Dans notre exemple, au niveau fonctionnel, il sera possible de retrouver par exemple une catégorie pour la distribution et une autre pour la conversion.

Maturation

La maturation concerne surtout la mise à jour des patrons. Cette dernière est essentielle dans une approche qui vise à faciliter la réutilisation par des ingénieurs. En effet, il faudra pouvoir modifier des possibles erreurs ou oublis lors de la capitalisation ou de la sauvegarde. Mais il est également nécessaire d'être à l'écoute des utilisateurs afin d'effectuer des modifications qui faciliteront la réutilisation.

Pour cela, la fiche d'accompagnement donnée en exemple (Tableau 15) peut être amenée à évoluer. Par exemple, il est possible d'y ajouter ou supprimer certaines catégories en fonction des demandes des utilisateurs.

Tableau 15. Exemple d'une fiche d'accompagnement pour le patron de niveau modèle générique « Distribute normal [value][type] »

NOM	Distribute Normal [value][type]
Known aliases	« Distribute Normal 230Vac », « Distribute Normal 115Vac », « Distribute Normal 28Vdc »
Keywords	Electrical Power Distribution, Normal, Flows, Function, Functional architecture
Context	Functional Vision
Problem	Multiple sources of electrical energy available, that has to be directed to the desired destination (conversion, emergency). The system needs to be protected against short-circuit, electrical art...
Solution	The function transforms electrical energy in space and time. Protection is managed according to data acquired from the rest of the system and/or from measurements made directly on the energy flow. Protection can involve autonomous or automatic actuation (switch). Network isolation possibilities are also possible.
Visualization	Cf. Figure 50 (high level) plus other views such as Figure 55
Author(s)	To complete at the creation
Creation date	To complete at the creation
Last modified	To complete at the creation
Statuts	Validated & Recommended

Réutilisation

Afin de guider la réutilisation, deux aspects essentiels se jouent dans la librairie, le premier est statique tandis que le second est dynamique.

En effet, il faut tout d'abord que la fiche et le patron permettent une compréhension claire du savoir-faire capitalisé ainsi que de son périmètre. Cela facilite l'implémentation avec le reste du système et la mise en cohérence du modèle. Ainsi, il est par exemple important de pouvoir typer des éléments dans l'outil qui faciliteront la réutilisation par les ingénieurs. Dans l'exemple fourni (Figure 60), il s'agira d'indiquer que les extrémités G et L des dominos correspondent à des systèmes externes pour le système.

Dans un second temps, pour guider et éviter la divergence de modélisation, il sera nécessaire de développer des fonctionnalités outillées. L'une des plus importantes, selon nous, est l'automatisation (semi-automatisation) de l'instanciation d'un modèle générique en un modèle spécifique. Nous reviendrons plus en détails sur cette fonctionnalité en sous-section 4.3.1.1.

La démarche de réutilisation est explicitée plus en détail dans la sous-section suivante.

4.2.2.3. Réutilisation des actifs d'ingénierie

Dans cette sous-section, l'objectif est de présenter la démarche de réutilisation en s'appuyant sur la formalisation du savoir-faire effectuée dans les sous-sections précédentes. Un exemple sur le système complet étant trop long, une focalisation est effectuée sur une partie du nouveau système à développer.

Chez Safran Electrical & Power, l'un des documents contractuels utilisés lors des phases d'appels d'offres est le *Single Line Diagram* (SLD). Il s'agit d'un schéma électrique du futur projet, qui comprend les génératrices et sources de puissances, les barres pour le transport d'énergie, les transformateurs d'énergie électrique ainsi que les charges. Ce document est du niveau organique, et il est important pour les ingénieurs et les architectes systèmes de pouvoir rapidement raccrocher ce niveau organique aux besoins clients en construisant rapidement une couche fonctionnelle du système.

Le SLD suivant (Figure 64) est donc une extraction d'un système complet.

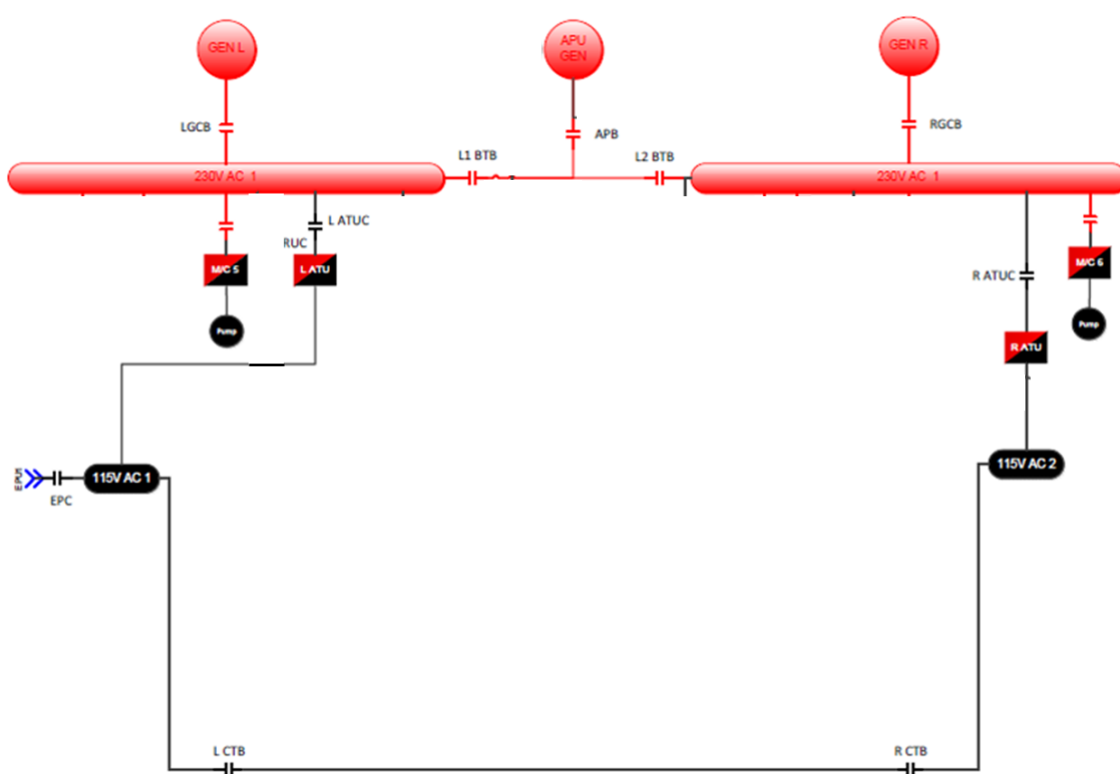


Figure 64. Extrait d'un SLD utilisé pour un projet avec Boeing

Sur l'exemple de la Figure 65, l'énergie électrique produite par une génératrice 230 Vac (●) doit être transmise à une pompe (●). Cette pompe ne peut consommer directement du 230 Vac, il faut donc convertir cette puissance en 115 Vac par l'intermédiaire d'un convertisseur (MIC 5). Une barre (●) est présente sur le chemin car dans la réalité, la puissance peut également être distribuée à d'autres charges ainsi qu'à l'autre partie du cœur. Différents organes de coupures (⚡) sont

également sur ce chemin afin de fournir la capacité d'isoler des parties du circuit en cas de défaut et de permettre à celui-ci de se reconfigurer afin de s'adapter aux différents modes de fonctionnement.

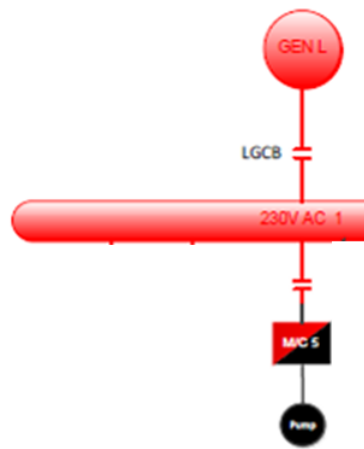


Figure 65. Zoom sur une partie du SLD

Projection

Dans l'exemple présenté, les patrons abstraits sont issus des patrons de conception, il n'y a donc pas besoin de les concrétiser (passage d'un patron abstrait en un patron de conception) puisqu'ils existent déjà.

Dans cet exemple, en raison de l'utilisation régulière du SLD comme un support pour la réflexion fonctionnelle chez les ingénieurs, l'objectif est donc de fournir aux ingénieurs système un guide pour construire rapidement une architecture fonctionnelle cohérente avec le SLD. Il faut donc fournir dans l'outil de modélisation des modèles génériques qui pourront être instanciés en modèles spécifiques.

Si des modèles génériques ont été capitalisés précédemment, la projection des patrons de conception en modèles génériques dans un autre langage de modélisation sera facilitée par la transcription des concepts de modélisation utilisés au niveau générique. Autrement dit, les ingénieurs méthodes et outils seront amenés à réaliser un travail de mise en correspondance afin d'identifier les concepts communs qui pourront être utilisés et les concepts manquants qui pourront être un frein à la réutilisation du savoir-faire capitalisé.

Dans l'exemple de ce manuscrit, la démarche de réutilisation est illustrée à l'aide du langage SysML utilisé dans l'outil IBM Rhapsody. Ce dernier peut en effet différer de celui utilisé dans la phase de capitalisation, pour des besoins clients, ou encore des raisons historiques (anciens projets, changements d'outils,...),... Les équivalences sont explicitées dans le Tableau 16. Il est à noter que SysML, via le concept de ports d'entrées/sorties offre une expressivité qui n'est pas disponible à l'heure actuelle dans X-ATIS concernant la modélisation des fonctions. Cela offre notamment des possibilités intéressantes sur la maturation des fonctions génériques en bibliothèques. Cependant d'un autre côté, la syntaxe étant plus stricte, il est nécessaire d'être rigoureux et d'accompagner la modélisation de règles pour faciliter la lecture.

Tableau 16. Transcription des concepts à utiliser entre les langages de modélisations pour X-ATIS et IBM Rhapsody (SysML)

X-ATIS	IBM Rhapsody
Fonction système	Call Behavior
Fonction technique racine	Call Behavior
Fonction technique feuille	Action
Flux fonctionnels	Object Flow
Système externe	Swimlane Frame
N/A (Pas d'équivalent)	Action Pin

La transcription des concepts entre les différents langages de modélisation est masquée aux yeux des ingénieurs systèmes afin de fournir uniquement les éléments nécessaires pour la modélisation. L'objectif est donc de leur fournir un ensemble de modèles génériques pour la modélisation de l'architecture fonctionnelle. En s'appuyant sur les modèles génériques capitalisés précédemment (Figure 53, Figure 55, Figure 56), voici une liste des éléments (en bibliothèque) de niveau générique qui seront utilisés pour modéliser le SLD (Figure 66, Figure 67) :

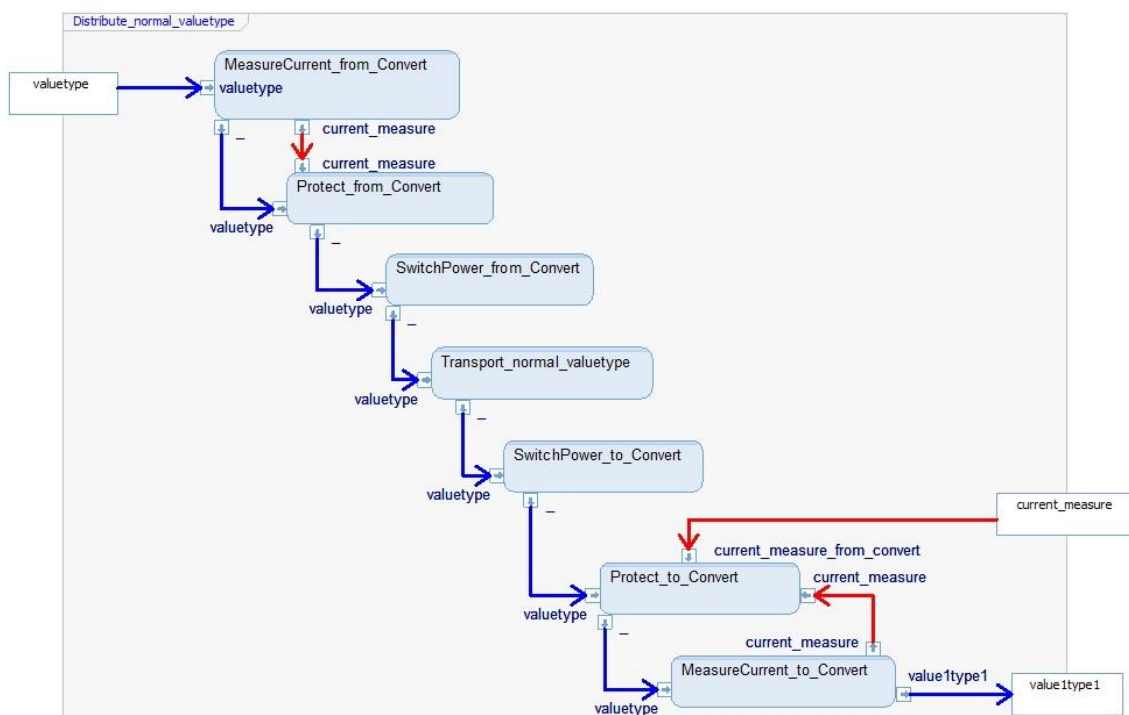


Figure 66. Fonction « Distribute normal [value][type] »

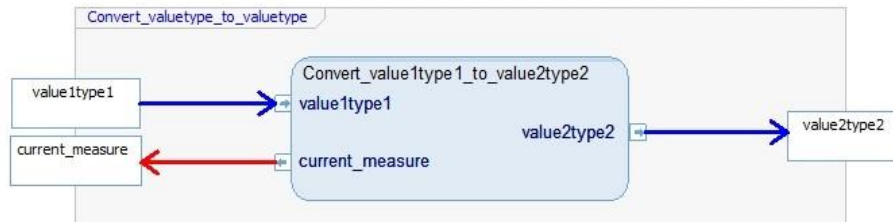


Figure 67. Fonction « Convert [value1][type1] to [value2][type2] »

Les couleurs des flux conservent les mêmes définitions que pour les modèles réalisés dans X-ATIS : flux électriques (en bleu), des flux d'informations (*data*) typés « hardware » (en rouge).

Instanciation

À partir de ces éléments génériques, l'ingénieur va instancier une architecture fonctionnelle spécifique au projet. En s'appuyant sur les modèles génériques, il est possible de modéliser des parties d'architectures fonctionnelles. En s'intéressant, par exemple, à l'amont de la conversion, la démarche conduit à intégrer un ensemble d'éléments issus des modèles génériques des fonctions « *Distribute normal...* » et « *Convert...* » (Figure 68).

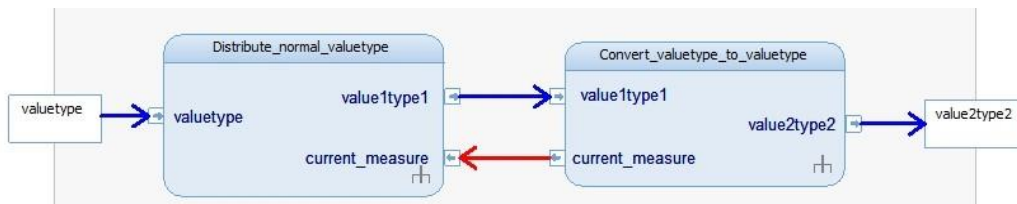


Figure 68. Association des fonctions « *Distribute normal...* » et « *Convert...* »

Ainsi, l'instanciation des modèles génériques permet d'obtenir un modèle spécifique (Figure 69, Figure 70) :

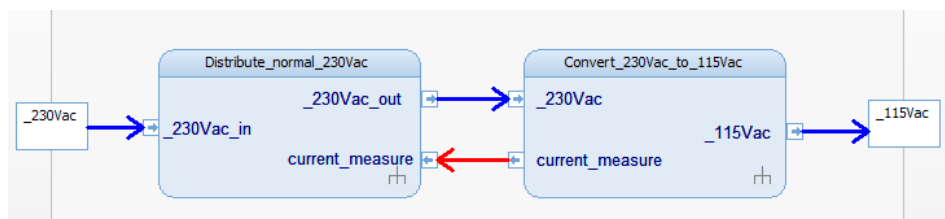


Figure 69. Modèle spécifique instancié (niveau N)

L'instanciation pour le 230Vac se reporte ensuite dans les sous-niveaux des fonctions. Par exemple pour la fonction « *Distribute_normal_230Vac* » (Figure 70) :

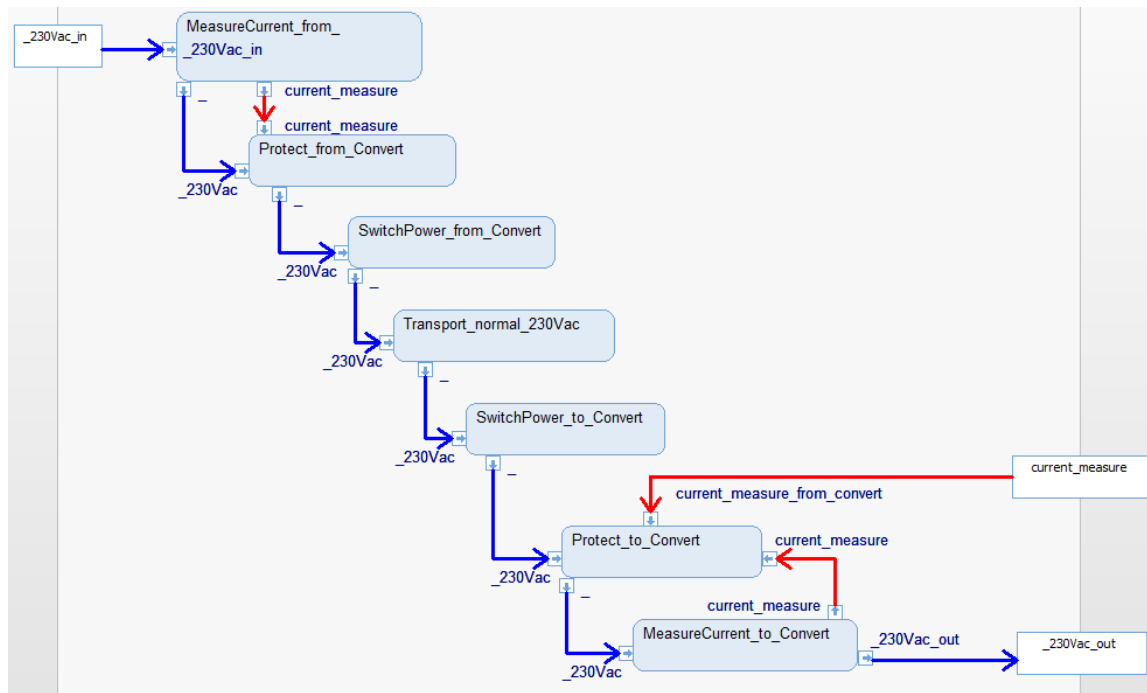


Figure 70. Modèle spécifique instancié (niveau N-1)

Dans cette partie du manuscrit, un exemple permettant de dérouler la démarche de montée et de redescente en abstraction complète a été présenté. La section suivante s'attache à mettre en perspective ces résultats par rapport aux objectifs initiaux.

4.3. Synthèse et évaluation

Dans la section précédente, un exemple d'application de la démarche MMIP a été explicité et a permis de démontrer la possibilité de réaliser une capitalisation du savoir-faire d'ingénierie en l'encapsulant dans des patrons. Ces derniers sont ensuite maturés et réutilisés lors de nouveaux projets. L'objectif de cette section est de prendre du recul sur ce qui a été proposé afin d'analyser si le niveau 3 de maturité visé a été atteint. Un retour d'expérience sur la réception de la démarche ainsi que sur l'impact sur l'adoption de l'ISBM sera également présenté.

4.3.1. Maturité du processus de réutilisation

4.3.1.1. Indicateurs de maturité

Le niveau 3 de maturité visé a été présenté dans la section 3.1.3.4.

Par rapport à la situation de départ chez SEP (section 3.4), la méthodologie MMIP a défini les processus et méthodes pour l'identification, la classification et la réutilisation (sections 3.3.2, 3.3.3, 4.1.2, 4.2.2). Ces définitions ont également permis de déterminer les objectifs de chaque partie de la méthodologie afin que l'application se fasse clairement.

Il faut cependant noter que pour l'indicateur « Bibliothèques disponibles avec catégorisation et partagée » il apparaît que si cette bibliothèque est disponible, elle est seulement initialisée et n'est pas outillée. Cela aura donc un impact lors du partage car elle nécessite d'être complétée. Nonobstant, un système de classement a été proposé et

permet aux ingénieurs de se raccrocher au cadre d'architecture recommandé par Safran. Cela permet de facilement identifier les parties de modèles à capitaliser.

En ce qui concerne la « Réutilisation avec guide », les fiches d'accompagnements aident à aiguiller le choix des ingénieurs tandis que le patron en lui-même fournit un guide métier et de modélisation intrinsèque intéressant grâce notamment à la notion de ports et de cardinalité sur ces derniers (section 4.2.2.3).

L'atteinte du niveau 3 (malgré une bibliothèque encore incomplète) a permis d'améliorer l'efficacité du processus de réutilisation. Cela s'explique par l'effort de formalisation du processus, qui a été facilité par les indicateurs de maturité de l'échelle. En effet, ces derniers ont permis de cibler les efforts à fournir.

L'atteinte des indicateurs de maturité pour le niveau 3 est résumée dans le Tableau 17.

Tableau 17. Indicateurs de maturité pour le niveau 3

Identification	<ul style="list-style-type: none"> • Processus/méthodes définis • Objectifs définis 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ ✓
Classification	<ul style="list-style-type: none"> • Processus/méthodes définis • Objectifs définis • Bibliothèque disponible, avec catégorisation et partagée (à compléter) 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ ✓ ✓
Réutilisation	<ul style="list-style-type: none"> • Processus/méthodes définis • Objectifs définis • Réutilisation avec guide 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ ✓ ✓

4.3.1.2. Perspectives

L'approche proposée visait à démontrer la capacité de mise en place d'une démarche industrielle pour la capitalisation et la réutilisation de savoir-faire via le concept de patron. Bien que ces travaux ne visaient pas le développement d'outils, cet aspect représente un travail important pour développer la chaîne de continuité numérique qui permettra une application flexible et efficace de la démarche.

De plus, l'outillage de la démarche est important, car nécessaire pour atteindre des niveaux de maturité supérieurs (section 3.1.3.5 & 3.1.3.6). En effet, la mesure de tendances et de performances, ou encore la création de capacités prédictives pour l'optimisation de la modélisation système, ne pourra se faire manuellement. Il sera nécessaire de disposer d'un ou plusieurs outils numériques capables d'interpréter les données et de les exploiter.

4.3.2. Retour d'expérience sur l'adoption de l'ISBM

4.3.2.1. Avant les patrons, la pensée système

La notion abstraite de « patron », qui est centrale dans ces travaux, l'était encore plus lorsqu'il a s'agit de l'introduire dans une démarche d'ISBM. Pour des individus dont l'approche ISBM était également abstraite, il était donc nécessaire d'expliquer et de guider par étape.

En 2017, lorsque ces travaux ont commencé, les approches ISBM (*MBSE*) étaient nouvelles pour l'entreprise et n'étaient pas bien comprises par tous les personnels. D'une part, l'origine de cette incompréhension se trouve dans la première partie de l'acronyme : « IS » pour Ingénierie Système. Non pas que les ingénieurs ne réalisaient aucune activité d'IS... bien au contraire ! Cependant, les exigences clients, les délais de livraisons ou encore l'effet tunnel ont fait perdre de vue les différentes dimensions d'un système. Ses aspects opérationnels, fonctionnels étaient en effet moins bien formalisés que ses aspects organiques. Cela s'explique notamment par le rôle d'équipementier précédemment joué par Zodiac Aero Electric avant qu'on ne lui demande de devenir systémier (cf section 1.3.1.1). D'autre part, cette incompréhension avait également pour origine l'incompréhension de la deuxième partie de l'acronyme : « BM » pour Basée sur les Modèles. En effet, certains réalisaient déjà des « modèles » et ne comprenaient donc pas l'apport de l'approche. Par exemple, l'approche MBD (*Model-Based Design*) était déjà utilisé pour la simulation multiphysique, le prototypage rapide ou encore pour le développement de logiciels embarquées. Une partie du travail a donc consisté à clarifier la différence et la complémentarité entre les approches MBD et ISBM.

Lors de cette transition, les différentes dimensions d'un système avaient bien été identifiées et différents groupes de travaux lancés avant 2017 sur ces différents sujets. Ainsi, alors que ces évolutions étaient en cours, l'ISBM a été perçue comme une nouvelle démarche qui allait « encore » bouleverser les pratiques. Or, loin de révolutionner la démarche d'IS, il a fallu faire comprendre que son objectif était de faire évoluer les manières de réaliser des activités d'ingénieries, qui étaient auparavant réalisées mais avec des moyens différents.

L'une des démarches d'explication entreprises a notamment pris le parti de suivre des ingénieurs qui souhaitaient réaliser une analyse fonctionnelle pour, d'une part, fournir un document d'entrée pour les ingénieurs sûreté de fonctionnement (pour qu'ils puissent, par exemple, réaliser une analyse dysfonctionnelle), et d'autre part, décliner des fonctions à un niveau allouable sur des composants. Par habitude, ils privilégiaient l'utilisation d'un logiciel de diagramme (type Microsoft Visio) pour la représentation de l'architecture fonctionnelle. Puis la décomposition fonctionnelle était retranscrite dans un tableur où l'allocation était également réalisée. S'ils souhaitaient réaliser une architecture organique, ils fallaient retourner sur un outil de type Visio (Figure 71).







Analyse fonctionnelle		
Allocation fonctions - composants		
Architecture organique		
<i>Gestion cohérence</i>	manuelle	automatique

Figure 71. Deux manières de réaliser la même activité d'IS

La démarche a donc été de les guider pour réaliser correctement la démarche via Visio/tableur afin de démontrer l'intérêt d'avoir une démarche système. Puis cette même démarche a été supportée dans un outil d'ISBM afin de montrer l'avantage d'un modèle unique ainsi que les gains de la démarche système.

De même, lors de ma participation à certains groupes de travail, j'ai commencé à introduire des vues descriptives issues d'outils d'ISBM et non d'outils type Visio, afin de familiariser mes interlocuteurs à de nouvelles représentations, de nouveaux outils.

Finalement, peu de personnes se sont révélées être opposées à l'usage de telles approches, la raison profonde d'un retard d'adoption de l'ISBM semble plutôt à chercher du côté de la maturité des outils et de l'investissement nécessaire à leur apprentissage et personnalisation. En effet, chaque entreprise a sa propre méthodologie de travail, et l'outil ISBM se doit de venir en support à cette approche, plutôt que la contraindre ou la limiter.

4.3.2.2. Adoption de l'ISBM par l'utilisation de patrons

Une fois la notion d'ISBM éclaircie, et son intérêt compris, il restait à démontrer l'intérêt des patrons pour la capitalisation et la réutilisation de savoir-faire.

Pour cela, il a fallu définir à quoi correspondait un patron en ISBM (section 2.3.2), et le niveau d'abstraction auquel il se situait (section 3.2.1.3). L'un des avantages de ce concept est ensuite de pouvoir l'adapter, afin de l'inclure dans la démarche visée. Dans nos travaux, il a donc été intégré en s'appuyant sur la démarche d'IS recommandée par l'entreprise (section 4.1.1.1.). Cependant, dans le cas de SEP, il est difficile d'estimer l'impact des patrons dans l'adoption de l'ISBM puisque la démarche n'a pas encore été déployée. Cependant, il faut noter que les travaux menés ont permis, d'une part, de démontrer l'avantage d'une démarche d'ISBM où il est possible de capitaliser et réutiliser le savoir-faire. D'autre part, ces travaux ont permis de démontrer l'importance de créer des bibliothèques de patrons avant de déployer la démarche d'ISBM auprès des ingénieurs. Ainsi, la feuille de route de définition et de déploiement de l'ISBM chez SEP tient compte de ces aspects.

En effet, il est également apparu assez rapidement chez les ingénieurs qui ont pu s'essayer à l'ISBM, que la modélisation d'un système pouvait se révéler très compliquée car il pouvait leur être difficile de raccrocher l'action de modélisation à leur manière de travailler. La raison la plus évidente était que la modélisation ne leur a pas permis de construire les livrables qu'ils devaient fournir. Il a donc fallu démontrer qu'il était possible dans un premier temps de construire des vues d'un système pour faciliter la communication en interne ou avec un client et que cela pouvait permettre de

grandement faciliter les échanges d'ingénieries. Dans un second temps, nous avons montré qu'il était possible de nourrir le modèle avec des données afin de générer les documents de travail ou les livrables souhaités. En ce sens, un important travail de fond est actuellement réalisé afin de comprendre et capturer les besoins de l'ensemble des parties prenantes d'un développement en termes d'ISBM. Ce travail a pour but de définir une méthodologie ISBM pour SEP. Les premiers retours soulignent un besoin fort de disposer de patrons pour la modélisation et la conception des systèmes et cela pour plusieurs raisons :

- Augmenter la qualité lors de la conception (moins d'oublis, meilleure gestion de la cohérence du système, règles de modélisation,...) ;
- Faciliter les interfaces métiers (découpage du système, coordination par rapport au planning,...) ;
- Gagner du temps (pour la modélisation, la conception, la validation,...).

Les travaux ont donc permis de démontrer l'intérêt des patrons pour la capitalisation et la réutilisation du savoir-faire en ISBM, et sont désormais intégrés dans les futurs travaux d'ISBM prévus chez SEP.

Conclusion

Ce chapitre s'est appuyé sur la contribution méthodologique du Chapitre 3 pour décrire et évaluer le déploiement de l'approche proposée sur un exemple. Ce dernier a également été l'occasion de montrer une manière d'adapter la démarche proposée à un cas spécifique, celui de SEP. La pertinence de l'utilisation du concept de patron a donc été explicitée afin de justifier certains choix dans l'application de la démarche. L'application de la démarche a permis d'illustrer les quatre niveaux d'abstraction définis en proposant un exemple s'appuyant sur des données concrètes et réelles. Le déroulement d'un exemple complet (montée et descente en abstraction) a également permis d'explicitier les différentes transitions entre les niveaux.

Nous avons également montré que l'objectif de maturité posé en Chapitre 3 a été atteint. Bien que la bibliothèque de patrons ne soit qu'à son commencement, les indicateurs de niveau 3 de maturité ont bel et bien été atteints. De plus, cela nous a fourni l'occasion de réaliser un retour d'expérience sur la mise en application de la démarche. L'introduction de principes de la pensée système via les patrons d'ingénierie a permis de diffuser plus largement la « pensée système ». Cependant, il faut noter que si la perception de l'ISBM a été améliorée, la mesure de la transition à l'ISBM est plus difficile à détailler. Il est évident que le fait que l'ISBM ne soit pas déployée opérationnellement pour l'instant chez SEP ne nous permet pas d'avoir un retour d'expérience suffisant. En effet, pour disposer d'un échantillon représentatif (nombre de personnes, temps de développement,...) il est impératif d'augmenter le taux de déploiement de l'ISBM sur les projets. Cela fournira la capacité d'atteindre le niveau 4 dans l'échelle de maturité (3.1.3.5) définie en Chapitre 3, et ainsi de pouvoir quantifier la transition vers l'ISBM. Néanmoins, les premiers retours vont dans le bon sens puisqu'une feuille de route pour la définition et le déploiement de l'ISBM a vu le jour chez SEP.

Conclusion

Les travaux présentés dans ce manuscrit montrent l'intérêt de valoriser le savoir-faire d'ingénierie pour faciliter la transition vers l'ISBM. Ils montrent également que le concept de « patron » est pertinent comme format de support à cette valorisation. Ainsi, il est possible de promouvoir l'ISBM en guidant les utilisateurs à l'aide de patrons qui ne nécessitent pas d'être experts en modélisation système.

L'approche méthodologique proposée pour faciliter l'adoption de l'ISBM, vise à accompagner la montée en maturité du processus de valorisation du savoir-faire d'ingénierie. Ceci est rendu possible par l'utilisation d'une échelle de maturité permettant d'évaluer des axes d'améliorations et de cibler les efforts à fournir. Cela permet d'augmenter la confiance dans les modèles utilisés et donc la confiance des ingénieurs dans la démarche d'ISBM.

Ensuite, l'approche méthodologique fournit un guide à suivre permettant de systémiser la capitalisation de savoir-faire ainsi que la réutilisation de modèles lors de nouveaux projets. Cette systématisation permet de favoriser l'application de pratiques d'ISBM lorsqu'un ingénieur n'est pas expert. Cela permet donc d'augmenter le taux d'utilisation de l'approche afin d'en faciliter l'adoption. De plus, d'un point de vue industriel, cette proposition permet de réduire les temps de développement et d'augmenter la confiance dans la modélisation.

Le cas d'étude a permis de montrer l'application d'une démarche de capitalisation et de réutilisation dans une approche d'ISBM. Ce travail a ainsi mis en évidence l'existence de nombreux patrons qui ont pu être formalisés ainsi que leur intérêt comme guide de modélisation et de conception pour les nouveaux développements.

L'approche proposée a permis de faciliter l'adoption de l'ISBM en permettant d'abord d'éclaircir la notion d'« ISBM » et d'en démontrer les avantages. De plus, la formalisation de « patrons » a favorisé l'acte de réutilisation lors de la modélisation du système en fournissant un guide pour l'ingénieur, qui peut alors se concentrer sur la conception du système. Cependant, cela a également montré que la réutilisation de ces patrons n'était pas triviale car nécessitant une définition claire et précise de leur rôle dans le cycle d'ingénierie pour que leur implémentation opérationnelle s'effectue de manière conviviale et ergonomique, notamment auprès des utilisateurs finaux.

La crise sanitaire provoquée par la propagation mondiale du SARS-Cov2 (COVID-19) a subitement modifié le contexte aéronautique et mis une nouvelle fois la lumière sur la complexité du monde où nous vivons, mais également sur celle que notre société a construit. Dans une situation de crise, l'un des réflexes est toujours le même : se remémorer des crises antérieures similaires en espérant y trouver des réponses aux problèmes actuels. Ainsi, bien que le contexte aéronautique ait bien changé depuis le début de la thèse, cette crise ne fait que renforcer la nécessité d'évolution du monde aéronautique face à ces pratiques d'ingénierie, tout en conservant les bonnes pratiques antérieures. Ces travaux offrent donc des perspectives selon trois axes : maturité des outils, automatisation (ou semi-automatisation) des processus de capitalisation et réutilisation, et gestion de la traçabilité et des allocations.

Dans le cas d'étude présenté, de nombreuses actions sont réalisées « à la main ». Or, cela peut s'avérer un frein très important auprès des ingénieurs. En effet, l'ISBM se doit de disposer d'outils capables de supporter les méthodes décrites par les différents processus méthodologiques. L'adoption industrielle de l'ISBM nécessite donc de développer des outils supports. Il sera donc nécessaire de disposer dans le futur, d'outils intégrant des bibliothèques facilement partageables de patrons pouvant être facilement mis à jour ou paramétrés. De ce point de vue, l'hétérogénéité des méthodologies et des outils est également un frein à l'adoption de l'ISBM. L'interopérabilité des modèles, provenant d'outils ou méthodologies différentes, est un axe important pour le passage à l'échelle industrielle.

Le deuxième axe de recherche concerne l'analyse des connaissances et des savoir-faire pour la capitalisation et la réutilisation. Dans ce mémoire, cette analyse a été réalisée manuellement, dans l'objectif de démontrer l'existence de « patrons » et la manière dont ils permettraient de réutiliser le savoir-faire. Une fois cette démarche réalisée, nous disposons d'un ensemble de données qu'il est envisageable de fournir en entrée d'un algorithme d'intelligence artificielle afin d'accélérer le processus de capitalisation. Il est également possible d'imaginer l'utilisation de l'intelligence artificielle lors de la réutilisation. En effet, les patrons sont des guides statiques pour l'ingénieur, tandis qu'une intelligence artificielle serait dynamique, réagissant en direct aux modifications apportées.

Enfin, le troisième axe de recherche, concerne l'utilisation des « patrons » comme vecteur des liens de traçabilité et d'allocation pour le système à développer. Il serait intéressant, par exemple, d'associer aux patrons de conception du niveau fonctionnel des liens de traçabilité « horizontaux » entre les fonctions et des exigences, ou encore entre des fonctions et des modes,... De plus, la proposition faite dans cette thèse ne permet pas de réutiliser un patron dont le savoir-faire capitalisé proviendrait à la fois du niveau fonctionnel et organique. Dans le cas d'une allocation fonction-composant, le lien est à réaliser manuellement alors que dans certains cas il ne change pas entre les différents projets. Ce choix concernant les liens « verticaux » a été délibéré et dépendant de notre contexte d'ingénierie. De manière générale, la capacité d'associer des liens de traçabilité entre les artefacts, en fonction des choix d'ingénieries favorisera la flexibilité et la personnalisation de l'approche proposée.

La volonté d'adoption de l'ISBM ne doit pas occulter le constat que cette approche ne résoudra pas tous les problèmes rencontrés lors de la conception des systèmes. Il nous paraît également nécessaire de travailler sur la création d'un environnement de développement permettant de s'appuyer sur un ensemble de technologies complémentaires pour la conception de systèmes complexes. Il est très souvent reproché à certains ingénieurs de ne pas « sortir » de leurs bureaux et de ne pas avoir conscience de la réalité du terrain au moment de concevoir une fonction ou de regrouper des composants. Avec l'ISBM, ce constat n'évolue pas, puisque le monde de la conception du système reste en 2D. Or, pour saisir toute la complexité des systèmes ainsi que de leur environnement, il est nécessaire de créer dans un environnement 3D. L'intégration et l'utilisation de technologies de réalité augmentée ou virtuelle lors des phases de conception permettrait de projeter le concepteur dans

certaines situations afin de parfaire l'architecture du système en amont de la production et des tests.

Bibliographie

- Alexander, C., Ishikawa, S., & Silverstein, M. (1977). A Pattern Language. In *Ch. Alexander*. <https://doi.org/10.2307/1574526>
- Aries, S., Le Blanc, B., & Ermine, J. (2008). MASK : une méthode d'ingénierie des connaissances pour l'analyse et la structuration des connaissances. In Hermes-Lavoisier (Ed.), *Management et ingénierie des connaissances, modèles et méthodes* (p. 208).
- Barbieri, G., Kernschmidt, K., Fantuzzi, C., & Vogel-Heuser, B. (2014). A SysML based design pattern for the high-level development of mechatronic systems to enhance re-usability. *IFAC Proceedings Volumes (IFAC-PapersOnline)*, 19(3), 3431–3437. <https://doi.org/10.3182/20140824-6-ZA-1003.00615>
- Barlas, K., Berki, E., Stefaneas, P., & Koletsos, G. (2017). Towards formal open standards: formalizing a standard's requirements. *Innovations in Systems and Software Engineering*, 13(1), 51–66. <https://doi.org/10.1007/s11334-016-0283-9>
- Barruel, F. (2005). *Analyse et conception des systèmes électriques embarqués. Application aux réseaux de bord d'avion*. Université Joseph-Fourier - Grenoble I.
- Barter, R. H. (1998). A Systems Engineering Pattern Language. *INCOSE International Symposium*, 350–353. <https://doi.org/10.1002/j.2334-5837.1998.tb00051.x>
- Beck, K., & Cunningham, W. (1987). *Using Pattern Languages for Object-Oriented Programs*. OOPSLA-87 Workshop on the Specification and Design for Object-Oriented Programming.
- Berthoz, A. (2009). *Simplexité (La)*. Odile Jacob.
- Boardman, J., Sauser, B., John, L., & Edson, R. (2009). *The Conceptagon A Framework for Systems Thinking and Systems Practice*. 3299–3304.
- Boehm, B. W. (1984). Software Engineering Economics. *IEEE Transactions on Software Engineering*, SE-10(1), 4–21. <https://doi.org/10.1109/TSE.1984.5010193>
- Boehm, B. W., & Abts, C. (1999). COTS integration: plug and pray? *IEEE Computer*, 32(1), 135–138. <https://doi.org/10.1109/2.738311>
- Bollinger, L. A., & Evins, R. (2015). Facilitating model reuse and integration in an Urban Energy Simulation platform. *Procedia Computer Science*, 51(1), 2127–2136. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2015.05.484>
- Bone, M., & Cloutier, R. (2010). The Current State of Model Based Systems Engineering : Results from the OMG™ SysML Request for Information 2009. *8th Conference on Systems Engineering Research - CSER*, 225–232.
- Bonjour, E., & Dulmet, M. (2006). Pilotage des activités de conception par l'Ingénierie Systèmes. In *Ingénierie de la conception et cycle de vie des produits*. (Traité IC2, pp. 85–105). Lavoisier.
- Bouffaron, F. (2016). *Co-spécification système exécutable basée sur des modèles -*

- Application à la conduite interactive d'un procédé industriel critique.*
<https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-01263624/>
- Bradley, J. L., Hughes, M. T., & Schindel, W. (2010). Optimizing delivery of global pharmaceutical packaging solutions, using systems engineering patterns. *20th Annual International Symposium of the International Council on Systems Engineering, INCOSE 2010*, 3, 2441–2447. <https://doi.org/10.1002/j.2334-5837.2010.tb01175.x>
- Budiardjo, E. K., & Zamzami, E. M. (2014). Feature Modeling and Variability Modeling Syntactic Notation Comparison and Mapping. *Journal of Computer and Communications*, 2(02), 101.
- Carroll, E. R., & Malins, R. J. (2016). *Systematic Literature Review : How is Model-Based Systems Engineering Justified ?* (Issue March). <https://www.incose.org/docs/default-source/enchantment/161109-carrolled-howismodel-basedsystemsengineeringjustified-researchreport.pdf?sfvrsn=2&sfvrsn=2>
- Cauvet, C., Rieu, D., Espinasse, B., Giraudin, J.-P., & Tollenaere, M. (1998). Ingénierie des systèmes d'information produit : une approche méthodologique centrée réutilisation de patrons. *Inforsid*, 71–90. <http://dblp.uni-trier.de/db/conf/inforsid/inforsid1998.html#CauvetREGT98>
- Chalé Góngora, H. G., Ferrogali, M., & Moreau, C. (2014). How to Boost Product Line Engineering with MBSE – A Case Study of a Rolling Stock Product Line. *Proceedings of the 5th International Conference on Complex Systems Design and Management*, 239–256.
- Chalé, H., Taoufenua, O., Gaudré, T., Topa, A., Lévy, N., & Boulanger, J.-L. (2011). Reducing the Gap Between Formal and Informal Worlds in Automotive Safety-Critical Systems. *INCOSE International Symposium*, 21(1), 1306–1320. <https://doi.org/10.1002/j.2334-5837.2011.tb01287.x>
- Chami, M., Aleksandraviciene, A., Morkevicius, A., & Bruel, J.-M. (2018). Towards Solving MBSE Adoption Challenges: The D3 MBSE Adoption Toolbox. *INCOSE International Symposium*, 28(1), 1463–1477. <https://doi.org/10.1002/j.2334-5837.2018.00561.x>
- Cloutier, R. J. (2005). Toward the Application of Patterns to Systems Engineering. *Systems Engineering, January 2005*, 73–80.
- Cloutier, R. J. (2006). *Applicability of patterns to architecting complex systems* (Issue May 2006). Stevens Institute of Technology.
- Cloutier, R. J. (2008). Model Driven Architecture for Systems Engineering. *INCOSE International Workshop, September*. http://personal.stevens.edu/~pkorfia/CONOPS/Research/1_018.pdf
- Cloutier, R. J., & Verma, D. (2007). Applying the concept of patterns to systems architecture. *Systems Engineering*, 10(2), 138–154. <https://doi.org/10.1002/sys.20066>
- Cochard, T. (2017). *Contribution à la génération de séquences pour la conduite de systèmes complexes critiques*. Université de Lorraine.

- Conte, A., Fredj, M., Hassine, I., Giraudin, J.-P., & Rieu, D. (2002). A Tool and a Formalism to Design and Apply Patterns. In Z. Bellahsène, D. Patel, & C. Rolland (Eds.), *Object-Oriented Information Systems* (pp. 135–146). Springer Berlin Heidelberg.
- Cook, D., & Schindel, W. (2017). Utilizing Mbse Patterns To Accelerate System Verification. *Insight*, 20(1), 32–41. <https://doi.org/10.1002/inst.12142>
- Coplien, J. O. (1997). Idioms and patterns as architectural literature. *IEEE Software*, 14(1), 36–42. <https://doi.org/10.1109/52.566426>
- Corbets, J. B., Willy, C. J., & Bischoff, J. E. (2018). Evaluating System Architecture Quality and Architecting Team Performance Using Information Quality Theory. *IEEE Systems Journal*, 12(2), 1139–1147. <https://doi.org/10.1109/JSYST.2017.2647980>
- Cornu, C., Chapurlat, V., Quiot, J.-M., & Irigoien, F. (2012). A maturity model for the deployment of Systems Engineering processes. *IEEE International Systems Conference SysCon 2012*, 1–6. <https://doi.org/10.1109/SysCon.2012.6189535>
- Cressent, R. (2012). *Valorisation de l'Ingénierie Système à Base de Modèles, pour l'analyse de sûreté de fonctionnement des systèmes complexes critiques intégrant des COTS*. Université D'Orléans.
- Darimont, R., Zhao, W., Ponsard, C., & Michot, A. (2017). Deploying a Template and Pattern Library for Improved Reuse of Requirements Across Projects. *Proceedings - 2017 IEEE 25th International Requirements Engineering Conference, RE 2017*, 456–457. <https://doi.org/10.1109/RE.2017.44>
- DeLano, D. E. (1998). Patterns mining. In *The Pattern Handbook: Techniques, Strategies, and Applications* (pp. 87–96).
- Demian, P., & Fruchter, R. (2006). An ethnographic study of design knowledge reuse in the architecture, engineering, and construction industry. *Research in Engineering Design*, 16(4), 184–195. <https://doi.org/10.1007/s00163-006-0010-x>
- Demirci, Ö. (2010). Development of Mbse/Uml Maturity Model. In *Doctoral Thesis, School of Engineering in Jönköping*. <http://hj.diva-portal.org/smash/get/diva2:353701/FULLTEXT01>
- Di Maio, M., Kapos, G. D., Klusmann, N., & Allen, C. (2016). Challenges in the modelling of SoS design alternatives with MBSE. *2016 11th Systems of Systems Engineering Conference, SoSE 2016*. <https://doi.org/10.1109/SYSOSE.2016.7542937>
- Estefan, J. A. (2008). Survey of Model-Based Systems Engineering (MBSE) Methodologies. *INCOSE MBSE Initiative*. <https://doi.org/10.1109/35.295942>
- Fiorèse, S., & Meinadier, J.-P. (2012). *Découvrir et comprendre l'ingénierie système*. Cépaduès.
- Fortune, J., & Valerdi, R. (2008). Considerations for Successful Reuse in Systems Engineering. *AIAA Space*, 1–8. <https://doi.org/10.2514/6.2008-7758>
- Friedenthal, S., Moore, A., & Steiner, R. (2008). *A practical guide to SysML: The*

- systems modeling language* (Elsevier (ed.)). Morgan Kaufmann.
- Friedland, B., Malone, R., & Herrold, J. (2016). Systems Engineering a Model Based Systems Engineering Tool Suite : The Boeing Approach. *INCOSE International Symposium, Is*.
- Gaffar, A., & Moha, N. (2005a). Semantics of a Pattern System. *Proceedings of the STEP International Workshop on Design Pattern Theory and Practice IWDPTP05*.
- Gaffar, A., & Moha, N. (2005b). Semantics of a Pattern System. *Proceedings of the STEP International Workshop on Design Pattern Theory and Practice IWDPTP05*.
- Gamma, E., Helm, R., Johnson, R., & Vlissides, J. (1995). *Design Patterns: Elements of Reusable Object-oriented Software*. Addison-Wesley Longman Publishing Co., Inc.
- Garcia, V. C., Lucrédio, D., Alvaro, A., Almeida, E. S. De, Fortes, R. P. D. M., & Meira, S. R. D. L. (2007). Towards a Maturity Model for a Reuse Incremental Adoption. *Brazilian Symposium on Software Components, Architectures and Reuse (SBCARS)*, 61–74.
- Gaskell, J. D., & Harrison, C. N. (2019). Improved System Engineering Technical Review's Entrance/Exit Criteria with Model Maturity Metrics. *5th IEEE International Symposium on Systems Engineering*.
- Gasser, L. (2012). Structuring activity diagrams. *14th IFAC Symposium on Information Control Problems in Manufacturing, Bucharest, Romania*. <https://doi.org/10.3182/20120523-3-RO-2023.00153>
- Gautam, N., Chinnam, R. B., & Singh, N. (2007). Design reuse framework : a perspective for lean development. *International Journal of Product Development*, 4(5), 485–507. <https://doi.org/10.1504/IJPD.2007.013044>
- Ge, B., Hipel, K. W., Yang, K., & Chen, Y. (2014). A novel executable modeling approach for system-of-systems architecture. *IEEE Systems Journal*, 8(1), 4–13. <https://doi.org/10.1109/JSYST.2013.2270573>
- Giraud, X. (2014). *Méthodes et outils pour la conception optimale des réseaux de distribution d'électricité dans les aéronefs*. Université de Toulouse.
- Gouyon, D., Bouffaron, F., & Morel, G. (2013). Specifying some key SE training artifacts. *Fourth International Conference on Complex Systems Design & Management*, 207–218. https://doi.org/10.1007/978-3-319-02812-5_15
- Gregory, J., Berthoud, L., Tryfonas, T., Rossignol, A., & Faure, L. (2020). The long and winding road: MBSE adoption for functional avionics of spacecraft. *Journal of Systems and Software*, 160, 110453. <https://doi.org/10.1016/j.jss.2019.110453>
- Gzara, L., Rieu, D., & Tollenaere, M. (2003). Product information systems engineering: An approach for building product models by reuse of patterns. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 19(3), 239–261. [https://doi.org/10.1016/S0736-5845\(03\)00028-0](https://doi.org/10.1016/S0736-5845(03)00028-0)

- Hahsler, M. (2005). A quantitative study of the adoption of design patterns by open source software developers. In *Free/Open Source Software Development* (pp. 103–124). Igi Global.
- Hanmer, R. S., & Kocan, K. F. (2004). Documenting architectures with patterns. *Bell Labs Technical Journal*, 9(1), 143–163. <https://doi.org/10.1002/bltj.20010>
- Haskins, C. (2003). 1.1.2 Using Patterns to Share Best Results - A proposal to codify the SEBOK. *INCOSE International Symposium*, 13(1), 15–23. <https://doi.org/10.1002/j.2334-5837.2003.tb02596.x>
- Haskins, C. (2007). Using Patterns to Transition Systems Engineering from a Technological to Social Context. *Systems Engineering*.
- Haskins, C. (2005). Application of patterns and pattern languages to systems engineering. *INCOSE International Symposium*, 1619–1627. <http://www.scopus.com/inward/record.url?eid=2-s2.0-84883318751&partnerID=tZOTx3y1>
- Hedman, J., & Andersson, B. (2014). Selection method for COTS systems. *Procedia Technology*, 16, 301–309. <https://doi.org/10.1016/j.protcy.2014.10.096>
- Holt, J., Perry, S., Payne, R., Bryans, J., Hallerstede, S., & Hansen, F. O. (2015). A Model-Based Approach for Requirements Engineering for Systems of Systems. *IEEE Systems Journal*, 9(1), 252–262. <https://doi.org/10.1109/JSYST.2014.2312051>
- Huldt, T., & Stenius, I. (2018). State-of-practice survey of model-based systems engineering. *Systems Engineering*, July, 1–12. <https://doi.org/10.1002/sys.21466>
- INCOSE. (2015). *Systems Engineering Handbook : A guide for system life cycle processes and activities* (Wiley). Wiley.
- Irshad, M., Petersen, K., & Poulding, S. (2018). A systematic literature review of software requirements reuse approaches. *Information and Software Technology*, 93(September 2017), 223–245. <https://doi.org/10.1016/j.infsof.2017.09.009>
- Jackson, M. (1995). *Software requirements & specifications: a lexicon of practice, principles and prejudices*. ACM Press/Addison-Wesley Publishing Co.
- Jansen, S., Brinkkemper, S., Hunink, I., & Demir, C. (2008). Pragmatic and Opportunistic Reuse in Innovative Start-up Companies. *IEEE Software*, 25(6), 42–49. <https://doi.org/10.1109/MS.2008.155>
- Kalawsky, R. S., Joannou, D., Tian, Y., & Fayoumi, A. (2013). Using architecture patterns to architect and analyze systems of systems. *Procedia Computer Science*, 16(March 2015), 283–292. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2013.01.030>
- Kalawsky, R. S., O'Brien, J., Chong, S., Wong, C., Jia, H., Pan, H., & Moore, P. R. (2013). Bridging the gaps in a model-based system engineering workflow by encompassing hardware-in-the-loop simulation. *IEEE Systems Journal*, 7(4), 593–605. <https://doi.org/10.1109/JSYST.2012.2230995>
- Kemayo, G. A. (2014). *Évaluation et validation des systèmes distribués avioniques*.

ENSMA.

- Kennedy, B. M., Sobek, D. K., Kennedy, M. N., Sobek II, D., Kennedy, M. N., Sobek, D. K., & Kennedy, M. N. (2014). Reducing Rework by Applying Set-Based Practices Early in the Systems Engineering Process. *Systems Engineering*, 17(3), 278–296. <https://doi.org/10.1002/sys21269>
- Korff, A. (2013). Re-using sysml system architectures. *Proceedings of the 4th International Conference on Complex Systems Design and Management*, 257–266. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-02812-5-19>
- Kotonya, G., Lock, S., & Mariani, J. (2010). Scrapheap Software Development: Lessons from an Experiment on Opportunistic Reuse. *IEEE Software*, 28(2), 68–74. <https://doi.org/10.1109/MS.2010.59>
- Krob, D. (2017). *CESAM : CESAMES Systems Architecting Method A Pocket Guide*. C.E.S.A.M.E.S. Groupe.
- La Rocca, G. (2012). Advanced Engineering Informatics Knowledge based engineering : Between AI and CAD . Review of a language based technology to support engineering design. *Advanced Engineering Informatics*, 26(2), 159–179. <https://doi.org/10.1016/j.aei.2012.02.002>
- Langlois, O., Foch, E., Roboam, X., & Piquet, H. (2005). De l'avion plus électrique à l'avion tout électrique : état de l'art et prospective sur les réseaux de bord. *J3eA*, 4(January 2005), 001. <https://doi.org/10.1051/bib-j3ea:2005601>
- Le Put, A. (2016). *Systems Product Line Engineering Handbook* (AFIS (ed.); AFIS). Éditions Cépaduès. <https://books.google.fr/books?id=VHVScwAAQBAJ>
- Madni, A. M., & Sievers, M. (2018). Model-based systems engineering : Motivation, current status, and research opportunities. *Systems Engineering*. <https://doi.org/10.1002/sys.21438>
- Majchrzak, A., Cooper, L. P., & Neece, O. E. (2004). Knowledge Reuse for Innovation. *Management Science*, 50(2), 174–188. <https://doi.org/10.1287/mnsc.1030.0116>
- Malak, R. J., Tucker, L., & Paredis, C. J. J. (2009). *Composing Tradeoff Models for Multi-Attribute System-Level Decision Making*. May, 993–1005. <https://doi.org/10.1115/detc2008-49970>
- Manzoni, L. V., & Price, R. T. (2003). Identifying extensions required by RUP (Rational Unified Process) to comply with CMM (Capability Maturity Model) levels 2 and 3. *IEEE Transactions on Software Engineering*, 29(2), 181–192. <https://doi.org/10.1109/TSE.2003.1178058>
- May, D., & Taylor, P. (2003). Knowledge Management with patterns. *Communications of the ACM*, 46(7), 94–99. <https://doi.org/10.1145/792704.792705>
- Miled, A. Ben. (2014). Reusing knowledge based on ontology and organizational model. *Procedia Computer Science*, 35(C), 766–775. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2014.08.159>
- Mourtzis, D., Doukas, M., & Giannoulis, C. (2016). An Inference-based Knowledge Reuse Framework for Historical Product and Production Information Retrieval.

- Procedia CIRP*, 41, 472–477. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2015.12.026>
- Murray, J. (2012). Model Based Systems Engineering (MBSE) Media Study. *International Council on System Engineering (INCOSE)*.
- Niu, N., Savolainen, J., Niu, Z., Jin, M., & Cheng, J.-R. C. (2013). A Systems Approach to Product Line Requirements Reuse. *IEEE Systems Journal*, PP(99), 1–10. <https://doi.org/10.1109/JSYST.2013.2260092>
- Nurcan, S., Soffer, P., Bajec, M., & Eder, J. (2016). *Advanced Information Systems Engineering: 28th International Conference, CAiSE 2016, Ljubljana, Slovenia, June 13-17, 2016. Proceedings*. <https://books.google.fr/books?id=zXZBDAAAQBAJ>
- OMG. (2015a). *OMG Unified Modeling Language TM (OMG UML), Version 2.5*. <http://www.omg.org/spec/UML/2.3/>
- OMG. (2015b). *OMG XML Metadata Interchange (XMI) Specification, Version 2.5.1 (Issue June)*. https://doi.org/10.1007/978-1-4899-7993-3_902-2
- OMG. (2017a). *OMG Systems Modeling Language (OMG SysML™) v1.5*. <http://www.omgsysml.org/>
- OMG. (2017b). *Systems Modeling Language (SysML®) v2 Request For Proposal (RFP)*.
- OMG. (2019). *OMG Meta Object Facility (MOF) Core Specification, Version 2.5.1 (Issue October)*.
- Oster, C., Kaiser, M., Kruse, J., Wade, J., & Cloutier, R. (2016). Applying Composable Architectures to the Design and Development of a Product Line of Complex Systems. *Systems Engineering*, 19(6), 522–534. <https://doi.org/10.1002/sys.21373>
- Palomares, C., Quer, C., & Franch, X. (2014). Requirements Reuse with the PABRE Framework. *Requirements Engineering Magazine*.
- Paydar, S., & Kahani, M. (2015). A semi-automated approach to adapt activity diagrams for new use cases. *Information and Software Technology*, 57(1), 543–570. <https://doi.org/10.1016/j.infsof.2014.06.007>
- Pfister, F., Chapurlat, V., Huchard, M., & Nebut, C. (2011). A design pattern meta model for systems engineering. In *IFAC Proceedings Volumes (IFAC-PapersOnline)* (Vol. 18, Issue PART 1). IFAC. <https://doi.org/10.3182/20110828-6-IT-1002.03005>
- Pfister, F., Chapurlat, V., Huchard, M., Nebut, C., & Wippler, J.-L. (2012). A Proposed Meta-Model for Formalizing Systems Engineering Knowledge, Based on Functional Architecture Patterns. *Systems Engineering*, 15(3). <https://doi.org/10.1002/sys.21204>
- Retho, F. (2015). *Méthodologie collaborative d'aide à la construction de produits virtuels pour la conception d'aéronefs à propulsion électrique*. Supélec.
- Rine, D. C., & Sonnemann, R. M. (1998). Investments in reusable software. A study of software reuse investment success factors. *Journal of Systems and Software*, 41(1), 17–32. [https://doi.org/10.1016/S0164-1212\(97\)10003-6](https://doi.org/10.1016/S0164-1212(97)10003-6)

- Rockley, A., Kostur, P., & Manning, S. (2003). *Managing Enterprise Content: A Unified Content Strategy*. New Riders.
<https://books.google.fr/books?id=61WSVFLVVn8C>
- Rossi, G., Schwabe, D., & Garrido, A. (1997). Design reuse in hypermedia applications development. *Hypertext*, 97, 57–66.
- Russell, M. (2012). Using MBSE to Enhance System Design Decision Making. *Procedia Computer Science*, 8, 188–193.
<https://doi.org/10.1016/j.procs.2012.01.041>
- Ryan, J., Sarkani, S., & Mazzuchi, T. (2014). Leveraging Variability Modeling Techniques for Architecture Trade Studies and Analysis. *Systems Engineering*, 17(1), 10–25. <https://doi.org/10.1002/sys.21247>
- SAE. (2010). *Guidelines for Development of Civil Aircraft and Systems*. SAE International. <https://doi.org/https://doi.org/10.4271/ARP4754A>
- Schindel, W. (2005). Requirements Statements Are Transfer Functions: An Insight from Model-Based Systems Engineering. *INCOSE International Symposium*, 1604–1618. <https://doi.org/10.1002/j.2334-5837.2005.tb00775.x>
- Schindel, W., & Peterson, T. (2013). Introduction to Pattern-Based Systems Engineering (PBSE): Leveraging MBSE Techniques. *INCOSE International Symposium*, 23(1), 1639. <https://doi.org/10.1002/j.2334-5837.2013.tb03127.x>
- Schreiber, G., Akkermans, H., Anjewierden, A., de Hog, R., R. Shadbolt, N., Van de Velde, W., & Wielinga, B. (2001). *Knowledge Engineering and Management - The CommonKADS Methodology* (Issue January). MIT Press.
<https://doi.org/10.7551/mitpress/4073.001.0001>
- Sen, A. (1997). The Role of Opportunism in the Software Design Reuse Process. *IEEE Transactions on Software Engineering*, 23(7), 418–436.
<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0012369216557730>
- Shani, U., & Broodney, H. (2015). Reuse in model-based systems engineering. *9th Annual IEEE International Systems Conference, SysCon 2015 - Proceedings*, 77–83. <https://doi.org/10.1109/SYSCON.2015.7116732>
- Sirin, G. (2015). *Ingénierie des systèmes basés sur les modèles appliquée au processus de conception de simulation complexe : vers une ontologie de la modélisation et la simulation pour favoriser l'échange des connaissances en entreprise étendue* [École Centrale Paris]. <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-01168567>
- Sirin, G., Paredis, C. J. J., Yannou, B., Coatanéa, E., & Landel, E. (2015). A Model Identity Card to Support Simulation Model Development Process in a Collaborative Multidisciplinary Design Environment. *IEEE Systems Journal*, 9(4), 1151–1162. <https://doi.org/10.1109/JSYST.2014.2371541>
- Sobek II, D., Ward, A. C., Liker, Jeffrey, K., Sobek, D., Ward, A. C., & Liker, Jeffrey, K. (1999). Toyota s Principles of Set-Based Concurrent Engineering. *Sloan Management Review*, Winter, 67–83.
- Software Engineering Institute. (1995). *Maturity Model Systems Engineering Capability Maturity Model Project* (Issue November).

http://resources.sei.cmu.edu/asset_files/MaturityModule/1995_008_001_16355.pdf

- Software Engineering Institute. (2010). CMMI for Development, Version 1.3: Improving Processed for Better Products and Services. In *Carnegie Mellon University, Software Engineering Institute* (Issue November). <https://doi.org/CMU/SEI-2010-TR-033> ESC-TR-2010-033
- Spangelo, S. C., Kaslow, D., Delp, C., Cole, B., Anderson, L., Fosse, E., Gilbert, B. S., Hartman, L., Kahn, T., & Cutler, J. (2012). Applying model based systems engineering (MBSE) to a standard CubeSat. *IEEE Aerospace Conference Proceedings*, 1–20. <https://doi.org/10.1109/AERO.2012.6187339>
- Trummer, C., Ruggenthaler, C., Kirchsteiger, C. M., Steger, C., Weiß, R., Pistauer, M., & Dalton, D. (2011). Searching extended IP-XACT components for SoC design based on requirements similarity. *IEEE Systems Journal*, 5(1), 70–79. <https://doi.org/10.1109/JSYST.2010.2065010>
- Valerdi, R. (2005). *The constructive systems engineering cost model (COSYSMO)*. University of Southern California.
- Vogel-Heuser, B., Fischer, J., Neumann, E.-M., & Diehm, S. (2018). Key maturity indicators for module libraries for PLC-based control software in the domain of automated Production Systems. *16th IFAC Symposium on Information Control Problems in Manufacturing*.
- Vogel, C. (1988). *Génie cognitif*. Masson.
- Vogelsang, A., Amorim, T., Pudlitz, F., Gersing, P., & Philipps, J. (2017). *Should I Stay or Should I Go? On Forces that Drive and Prevent MBSE Adoption in the Embedded Systems Industry*. <http://arxiv.org/abs/1709.00266>
- Wang, G., Valerdi, R., & Fortune, J. (2010). Reuse in systems engineering. *IEEE Systems Journal*, 4(3), 376–384. <https://doi.org/10.1109/JSYST.2010.2051748>
- Wang, L., Izygon, M., Okon, S., Garner, L., & Wagner, H. (2016). Effort to accelerate MBSE adoption and usage at JSC. *AIAA Space and Astronautics Forum and Exposition, SPACE 2016*, 1–10. <https://doi.org/10.2514/6.2016-5542>
- Weilkiens, T. (2012). *Variant Modeling with SysML*. Tim Weilkiens. <https://books.google.fr/books?id=pyM6DAAAQBAJ>
- White, C. J., & Mesmer, B. L. (2019). Research needs in systems engineering: Report from a University of Alabama in Huntsville workshop. *Systems Engineering, March*, 1–11. <https://doi.org/10.1002/sys.21501>
- Wu, Q., Gouyon, D., Levrat, E., & Boudau, S. (2020). Use of Patterns for Know-How Reuse in a Model-Based Systems Engineering Framework. *IEEE Systems Journal*, 1–12. <https://doi.org/10.1109/JSYST.2020.2975116>
- Wu, Q., Gouyon, D., Levrat, É., & Boudau, S. (2018). A Review of Know-How Reuse with Patterns in Model-Based Systems Engineering. In *Proceedings of the Ninth International Conference on Complex Systems Design & Management, CSD&M Paris* (pp. 219–229). <https://doi.org/10.1007/978-3-030-04209-7>
- Ye, Y., & Fischer, G. (2002). Supporting reuse by delivering task-relevant and

personalized information. *Proceedings of the 24th International Conference on Software Engineering - ICSE '02*, 513. <https://doi.org/10.1145/581339.581402>

Younoussi, S., & Roudies, O. (2016). Capability and maturity model for Reuse: A comparative study. *2016 2nd International Conference on Cloud Computing Technologies and Applications (CloudTech)*, 302–308. <https://doi.org/10.1109/CloudTech.2016.7847714>

Annexe

Tableau 18. Résultat du calcul de maturité global en fonction des combinaisons de maturité atteignables

M_I	M_L	M_R	M_{VSEA}
1	1	1	1
2	1	1	1,3
2	2	1	1,7
2	2	2	2
3	2	2	2,3
3	3	2	2,7
3	3	3	3
4	3	3	3,3
4	4	3	3,7
4	4	4	4
5	4	4	4,3
5	5	4	4,7
5	5	5	5

Résumé

L'« Ingénierie Système Basée sur les Modèles » (ISBM), est une approche d'Ingénierie Système dans laquelle la modélisation est le support de toutes les activités d'ingénierie. Elle est plébiscitée par les industriels comme étant une manière de satisfaire le besoin de prise en compte de la complexité croissante des systèmes, pour lesquels les pratiques d'Ingénierie Systèmes centrées sur les documents arrivent à leurs limites. Cependant, de nombreux retours d'expérience sur la transition vers l'ISBM soulignent la forte courbe d'apprentissage nécessaire à sa mise en œuvre, ainsi que la difficulté pour les ingénieurs de se l'approprier.

Dans ce contexte, la contribution de ce manuscrit vise à faciliter l'adoption de l'ISBM par la valorisation des actifs d'ingénierie. Elle cherche à systématiser la capitalisation et la réutilisation de savoir-faire en utilisant le concept de « patron », dont le rôle et le périmètre sont définis dans le cadre de l'ISBM. De manière à accompagner la montée en maturité des processus de capitalisation et de réutilisation au sein d'une entreprise, elle introduit une échelle de maturité permettant d'évaluer une situation d'ingénierie de manière à cibler les efforts à fournir. La contribution porte également sur la formalisation de niveaux d'abstraction des patrons capitalisés et de mécanismes de transition entre ces niveaux d'abstraction. Sur cette base, elle formalise les processus de l'approche « Minage-Maturation-Implémentation de Patrons » (MMIP), dont l'objectif est d'être un guide pour les ingénieurs dans la capitalisation et la réutilisation d'actifs d'ingénierie.

La contribution a été éprouvée sur un cas d'étude, dans le cadre d'un nouveau projet industriel au sein de Safran Electrical & Power. L'objectif était de démontrer l'existence de patrons techniques, de les formaliser et de les réutiliser dans un contexte d'ISBM.

Mots-clés : Ingénierie Système Basée sur les Modèles, Réutilisation, Patrons, Maturité

Abstract

Model Based System Engineering (MBSE) is a System Engineering approach in which modeling is the backbone of all engineering activities. It is widely accepted by the industry as a way to satisfy the need to take into account the ever-increasing complexity of systems, for which document-based Systems Engineering practices are reaching their limits. However, numerous feedbacks on the transition to MBSE highlight the steep learning curve required for its implementation, as well as the difficulty for engineers to master it.

In this context, the contribution of this manuscript aims at facilitating the adoption of MBSE through the valorization of engineering assets. It seeks to systematize the capitalization and reuse of know-how by using the concept of "pattern", whose role and scope are defined within the framework of MBSE. In order to increase the maturity of capitalization and reuse processes within a company, a maturity scale is also introduced to assess an engineering situation in order to target the efforts to be made. The contribution also deals with the formalization of levels of abstraction of capitalized patterns and of transition mechanisms between these levels of abstraction. On this basis, it formalizes the "Mining-Maturation-Implementation of Patterns" (MMIP) process, whose objective is to be a guide for engineers in the capitalization and reuse of engineering assets.

The contribution has been tested on a case study, within the framework of a new industrial project at Safran Electrical & Power. The objective was to demonstrate the existence of patterns, to formalize them and to reuse them in an MBSE context.

Keywords: Model-Based Systems Engineering (MBSE), Reuse, Patterns, Maturity